



**Nelson Jorge Silva  
Helena**

**Caracterização mecânica de paredes com fardos de  
palha**



**Nelson Jorge Silva  
Helena**

**Caracterização mecânica de paredes com fardos de palha**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Auxiliar, e do Doutor Aníbal Guimarães da Costa, Professor Catedrático, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus Pais e namorada pelo incansável apoio e compreensão.

## **o júri**

Presidente

Prof. Doutora Margarida João Fernandes De Pinho Lopes  
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António José Coelho Dias Arêde  
professor associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Humberto Salazar Amorim Varum  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Aníbal Guimarães da Costa  
professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

## **Agradecimentos**

Uma tese de mestrado é o culminar de um trabalho colectivo, embora a sua avaliação seja de cariz individual.

É com enorme contentamento que passo a expressar os meus profundos e sinceros agradecimentos para com aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Humberto Varum, agradeço o precioso apoio e os ensinamentos que disponibilizou.

Ao professor Doutor Aníbal Costa, agradeço o apoio, as sugestões e todos os ensinamentos que sempre transmitiu ao longo deste trabalho.

Ao Engenheiro António Figueiredo, agradeço toda a disponibilidade demonstrada ao longo de toda a componente prática deste trabalho.

Ao Sr. Victor, agradeço o apoio e participação na construção das paredes de na campanha experimental.

À empresa Paviutil Construções, Lda., agradeço por ter disponibilizado uma equipa de trabalho para realizar o revestimento das paredes.

Ao Doutor Artur Basto, quero aqui expressar um muito obrigado por ter apoiado este projecto e por ter sido o rosto da ajuda da Paviutil Construções Lda.

Ao instituto da Construção, quero agradecer o financiamento para aquisição dos materiais e equipamentos necessários na realização do presente trabalho.

Não posso deixar de manifestar um muito obrigado a todos os colegas, Gonçalo Bogalho, Bruno Migueis, Vasco Sousa, Jorge Fonseca, Paulo Pereira e Simão Cardoso pela amizade o apoio e os incentivos à realização desta dissertação.

Não quero deixar de expor um agradecimento especial à minha namorada Ingrid Alves por toda amizade, compreensão, pela força e por todos os incentivos que me deu ao longo de toda a dissertação.

## **palavras-chave**

Construção em fardos de palha, resistência à compressão de paredes, comportamento cíclico de paredes.

## **resumo**

Em Portugal, na última década construíram-se habitações com recurso a fardos de palha, que podem ser encontradas na comunidade Tamera, na Quinta dos Melros e no Parque Natural de São Mamede. Devido a um possível aumento da procura por este tipo de construção, existe a necessidade de compreender o comportamento mecânico das paredes que resultam das técnicas construtivas com fardos de palha. Deste modo, garantir-se-á a essas construções níveis de segurança actuais.

Esta dissertação efectua a caracterização mecânica de doze paredes construídas recorrendo a quatro técnicas construtivas. Realiza a caracterização mecânica da argamassa empregue na execução do revestimento das paredes, determina a massa volúmica dos fardos de palha usados para edificar as referidas paredes e contabiliza o custo construtivo por metro quadro de parede de cada técnica construtiva.

Apresentam-se os resultados da campanha experimental que consistiu na realização de dois tipos de ensaios: ensaios de compressão vertical realizados em oito paredes, duas de cada técnica em estudo, e ensaios cíclicos horizontais no plano, efectuados sobre uma parede de cada técnica estudada. Este estudo permite, de certa forma, reforçar a confiança neste tipo de construção, dita ecológica. No entanto, é necessário continuar a desenvolver estudos para que no futuro seja possível realizar um documento de regulamentação que permita garantir a segurança e o conforto dos utilizadores das construções com fardos de palha.

**keywords**

Straw bale building, straw bale, compressive strength of walls, Cyclic behaviour of walls

**abstract**

During the last decade in Portugal, several houses have been built using straw bales; one can find them in *Tamera* community, in *Quinta dos Melros* and in *São Mamede* Natural Park. Due to a possible increase in the demand for this type of construction, there is a need to understand the mechanical behaviour of straw-bale walls. This way, one will be able to guarantee that these constructions have appropriate levels of security.

This essay describes the mechanical behaviour of twelve walls built according to four different construction techniques. The essay also characterizes the straw bales regarding density, and the plaster applied in the walls. The mechanical properties of the plaster applied in the walls is characterized, the volume of the bales of straw used to build the abovementioned walls is determined and the cost of construction per square meter of each of the construction technique is calculated.

The findings of the experiment are also presented. The experiment consisted in two types of tests: vertical compression tests on eight walls, two built according to each construction technique, and horizontal cyclic tests on four walls, each built according to each one of the construction techniques.

The findings of this experiment reinforce the trust in this type of ecological construction. Nevertheless, it is important to develop new studies on the subject so that it is possible, in the near future, to create regulations that will assure the safety and the comfort of users of straw-bale buildings.

## Índice geral

Índice geral .....	viii
Índice de figuras .....	xii
Índice de Tabelas .....	xvi
<b>Capítulo 1 - Introdução.....</b>	<b>18</b>
1.1    Enquadramento .....	19
1.2    Motivação .....	20
1.3    Objectivos do Trabalho .....	21
1.4    Estratégia .....	21
1.5    Estrutura da dissertação .....	22
<b>Capítulo 2 - Construção com fardos de palha.....</b>	<b>23</b>
2.1    Construção com fardos de palha – Enquadramento Histórico.....	24
2.2    Construção com fardos de palha em Portugal.....	26
2.3    Palha como material de construção .....	28
2.3.1    Propriedades da palha .....	28
2.3.2    Fardos de palha.....	30
2.4    Técnicas Construtivas.....	32
2.4.1    Técnica de fardos de palha portadores .....	33
2.4.2    Técnicas de fardos de palha não portadores.....	34
2.5    Revestimento das paredes .....	37
2.6    Vantagens e desvantagens da construção com fardos de palha .....	38
2.6.1    Vantagens .....	38
2.6.2    Desvantagens.....	39
<b>Capítulo 3 - Anteriores caracterizações mecânicas de sistemas construtivos com fardos de palha.....</b>	<b>41</b>
3.1.1    Ensaio de compressão em fardos de palha não rebocados. ....	42



3.1.2	Ensaio de compressão em paredes de fardos de palha não rebocadas ....	43
3.1.3	Ensaio de compressão sobre fardos de palha rebocados .....	44
3.1.4	Ensaio de compressão em paredes de fardos de palha rebocadas.....	45
3.1.5	Ensaio cíclico de carga horizontal no plano.....	48
<b>Capítulo 4 - Caracterização da argamassa e dos fardos de palha .....</b>		<b>49</b>
4.1.1	Caracterização dos fardos de palha.....	50
4.1.2	Escolha e caracterização da argamassa de revestimento .....	50
<b>Capítulo 5 - Sistema e instrumentação da campanha experimental .....</b>		<b>55</b>
5.1	Sistema e instrumentação do ensaio de compressão .....	56
5.2	Sistema e instrumentação do ensaio cíclico horizontal no plano.....	59
<b>Capítulo 6 - Técnica Nebraska Armada – caracterização mecânica de paredes ....</b>		<b>62</b>
6.1	Descrição da técnica .....	63
6.2	Processo construtivo da técnica .....	64
6.3	Contabilização dos custos.....	67
6.4	Descrição dos ensaios mecânicos.....	68
6.4.1	Descrição do ensaio de compressão .....	68
6.4.2	Descrição do ensaio cíclico horizontal no plano .....	70
6.5	Resultados e conclusões gerais .....	71
6.5.1	Resultados do ensaio de compressão .....	71
6.5.2	Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano.....	73
<b>Capítulo 7 - Técnica C.S.T – caracterização mecânica de paredes .....</b>		<b>75</b>
7.1	Descrição da técnica .....	76
7.2	Processo construtivo da técnica .....	77
7.3	Contabilização dos custos.....	80
7.4	Sistema e instrumentação dos ensaios mecânicos.....	81
7.5	Descrição dos ensaios mecânicos.....	82

7.5.1	Descrição dos ensaios de compressão .....	82
7.5.2	Descrição do ensaio cíclico horizontal no plano .....	84
7.6	Resultados e considerações gerais.....	85
7.6.1	Resultados do ensaio de compressão .....	85
7.6.2	Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano.....	87
<b>Capítulo 8 - Técnica G.R.E.B – caracterização mecânica de paredes.....</b>		<b>89</b>
8.1	Descrição da técnica .....	90
8.2	Processo construtivo da técnica .....	91
8.3	Contabilização dos custos.....	93
8.4	Descrição dos ensaios mecânicos.....	94
8.4.1	Descrição dos ensaios de compressão .....	94
8.4.2	Descrição do ensaio cíclico horizontal no plano .....	96
8.5	Resultados e considerações gerais.....	98
8.5.1	Resultados do ensaio de compressão .....	98
8.5.2	Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano.....	99
<b>Capítulo 9 - Técnica Abarrotar – caracterização mecânica de paredes .....</b>		<b>101</b>
9.1	Descrição da técnica .....	102
9.2	Processo construtivo da técnica .....	103
9.3	Contabilização dos custos.....	105
9.4	Descrição dos ensaios mecânicos.....	106
9.4.1	Descrição dos ensaios de compressão .....	106
9.4.2	Descrição do ensaio cíclico de carga horizontal no plano .....	107
9.5	Resultados e considerações gerais.....	109
9.5.1	Resultados do ensaio à compressão .....	109
9.5.2	Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano.....	110

<b>Capítulo 10 - Comparação de resultados, considerações finais e desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>112</b>
10.1 Comparação de resultados .....	113
10.2 Considerações finais .....	116
10.3 Possíveis linhas de desenvolvimentos futuros .....	117
<b>11 Referências bibliográficas.....</b>	<b>119</b>

## Índice de figuras

Figura 1: Burke House, Alliance, Nebraska, U.S.A, 1903 (Minke, <i>et al.</i> , 2005).....	24
Figura 2: Simonton House, Nebraska, U.S.A, 1908 (Baindrigge, 1994).....	24
Figura 3: Casa La feuillete, França (Montargis);.....	25
Figura 4: Auditório construído com fardos de palha em Tamera (Beja) .....	26
Figura 5: Casa dos 3 arcos em Tamera (Beja).....	27
Figura 6: Casa de turismo rural (Concelho de Marvão).....	27
Figura 7: Casa em palha (Quinta dos Melros).....	28
Figura 8: Talo tubular da palha.....	29
Figura 9: Composição da palha segundo o tipo de cereal (trigo, cevada e arroz), adaptado de Bouter, <i>et al.</i> , 2009 .....	29
Figura 10:Tipos de fardos utilizados na construção .....	31
Figura 11: Fardo assente de “Flat” .....	31
Figura 12: Fardo assente de “Edge” .....	31
Figura 13:Esquema construtiva da técnica de Nebraska, adaptado de Krumm, <i>et al.</i> , 2009.....	33
Figura 14: Disposições da estrutura porticada de madeira, adaptado de Macdonald, 2003.....	34
Figura 15: Ilustração da construção em fardos de palha com estrutura porticada de madeira, adaptado de Chiras, 2004. ....	35
Figura 16: Ilustração da Técnica de G.R.E.B, adaptado de Brossamain, <i>et al.</i> , 2006. ....	36
Figura 17: Ilustração da Célula sob Tensão - Técnica C.S.T, adaptado de <a href="http://www.habitatvegetal.com/assets/docs/entrepailleetterre.pdf">http://www.habitatvegetal.com/assets/docs/entrepailleetterre.pdf</a> .....	37
Figura 18: Moldes dos provetes prismáticos das 4 misturas .....	52
Figura 19: Ensaio à flexão.....	52
Figura 20: Ensaio à compressão .....	52

Figura 21: Representação esquemática e imagem do ensaio de compressão .....	57
Figura 22: Planta da instrumentação [mm] .....	58
Figura 23: Planta da instrumentação [mm] .....	58
Figura 24: Lei de deslocamento.....	59
Figura 25: Sistema do ensaio cíclico de carga horizontal no plano.....	60
Figura 26: Imagem do ensaio cíclico horizontal no plano .....	60
Figura 27: Planta da instrumentação [mm] .....	61
Figura 28: Ilustração da Técnica Nebraska Armada.....	63
Figura 29: Base da parede da técnica Nebraska Armada .....	64
Figura 30: Representação das regiões vazias de palha entre os fardos .....	65
Figura 31: Parede com armadura .....	65
Figura 32: Realização do chapisco .....	66
Figura 33: Realização das camadas de regularização .....	67
Figura 34: Parede rebocada .....	67
Figura 35: Fissuras na parede NA-1 .....	69
Figura 36: Fissuras na parede NA-2 .....	69
Figura 37: Primeiras fissuras na parede NA-3 .....	70
Figura 38: Fissura da base Oeste (O) da parede NA-3 .....	70
Figura 39: Fissura da base Este (E) da parede NA-3 .....	71
Figura 40: Dano na da base da parede NA-3.....	71
Figura 41: Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação .....	72
Figura 42: Curvas histeréticas tensão <i>versus</i> deslocamento.....	73
Figura 43: Ilustração da técnica C.S.T (Célula Sob Tensão) .....	77
Figura 44: Estrutura principal.....	78
Figura 45: Ligação lateral pelo exterior .....	78

Figura 46: Ligação do montante central.....	78
Figura 47: Ligação lateral interior .....	78
Figura 48: Compressão localizada .....	79
Figura 49: Aplicação dos elementos longitudinais .....	79
Figura 50: Parede em “bruto” .....	79
Figura 51: Realização do chapisco .....	80
Figura 52: Realização das camadas de regularização .....	80
Figura 53: Parede reboca.....	80
Figura 54: Planta da instrumentação [mm] .....	82
Figura 55: Dano na parede CST-1 .....	83
Figura 56: Dano na parede CST-2 .....	83
Figura 57: Evolução do dano na parede CST-3 até ao deslocamento imposto de 15,86mm.....	84
Figura 58: Dano final na parede CST-3 .....	85
Figura 59: Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação .....	86
Figura 60: Curvas histeréticas de tensão <i>versus</i> deslocamento .....	87
Figura 61: Ilustração da técnica G.R.E.B.....	90
Figura 62: Cavidades para alojar a cabeça dos ligadores.....	91
Figura 63: Estrutura tridimensional de madeira .....	91
Figura 64: Ligação nos cunhais .....	91
Figura 65: Lista do exterior da estrutura .....	91
Figura 66: Rede <i>Cintoflex</i> preta de malha 15x20mm .....	92
Figura 67: Fixação da rede plástica <i>Cintoflex</i> .....	92
Figura 68: Execução da camada de regularização .....	93
Figura 69: Parede rebocada .....	93

Figura 70: Dano na parede GREB-2 .....	96
Figura 71: Dano na face Norte da parede GREB-3 .....	97
Figura 72: Dano na face Sul da parede GREB-3 .....	97
Figura 73: Gráfico de tensão <i>versus</i> deformação .....	98
Figura 74: Curvas histeréticas de tensão <i>versus</i> deslocamento .....	99
Figura 75: Ilustração da Técnica Abarrotar .....	103
Figura 76: Estrutura tridimensional de madeira .....	104
Figura 77: Vista do exterior da estrutura .....	104
Figura 78: Vista pelo interior da estrutura .....	104
Figura 79: Vista do exterior da estrutura .....	104
Figura 80: Vista pelo interior da estrutura .....	104
Figura 81: Vista do exterior da estrutura .....	104
Figura 82: Vista pelo interior da estrutura .....	104
Figura 83: Parede com enchimento de 4cm em argamassa .....	105
Figura 84: Realização da camada de regularização .....	105
Figura 85: Paredes rebocada .....	105
Figura 86: Dano na parede Ab-1 .....	107
Figura 87: Dano na parede Ab-2 .....	107
Figura 88: Dano na face Norte da parede Ab-3 .....	108
Figura 89: Dano na face sul da parede Ab-3 .....	109
Figura 90: Rotação da parede Ab-3 .....	109
Figura 91: Gráficos de tensão <i>versus</i> deformação .....	109
Figura 92: Curvas histeréticas de tensão <i>versus</i> deslocamento .....	111
Figura 93: Gráficos de tensão <i>versus</i> deformação .....	114
Figura 94: Envoltentes das curvas histeréticas de tensão <i>versus</i> deslocamento .....	115

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Ficha técnica dos fardos de palha, adaptado de Krumm, <i>et al.</i> , 2009 .....	32
Tabela 2: Resultados dos ensaios (Bou-ali, 1993), (Watts, <i>et al.</i> , 1995), (Zhang, 2002) e (Ashour, 2003).....	42
Tabela 3: Resultados do ensaio, Força/Deslocamento (Bou-ali, 1993) .....	43
Tabela 4: Resultados do ensaio (Blum, 2002).....	43
Tabela 5: Resultados do ensaio (Mar, 2003). .....	45
Tabela 6: Resultados do ensaio (Platts, <i>et al.</i> , 1996). .....	45
Tabela 7: Resultados do ensaio (Carrick, <i>et al.</i> , 1998) .....	46
Tabela 8: Resultados do ensaio (Ruppert, <i>et al.</i> , 1999) .....	46
Tabela 9: Resultados do ensaio (Dreger, <i>et al.</i> , 2002).....	47
Tabela 10: Propriedades das paredes, adaptado de Faine, <i>et al.</i> , 2002.....	47
Tabela 11: Resultados do ensaio (Faine, <i>et al.</i> , 2002) .....	47
Tabela 12: Resultados dos ensaios (Ash, <i>et al.</i> , 2003).....	48
Tabela 13: características da amostra de fardos .....	50
Tabela 14: Composição das argamassas .....	51
Tabela 15: Resultados dos ensaios de flexão e de compressão das argamassas .....	53
Tabela 16: Resultados dos ensaios à flexão e à compressão das amostras recolhidas ao longo da construção das paredes.....	54
Tabela 17: Nomenclatura usada para identificar das paredes de cada técnica .....	56
Tabela 18: Características da rede metálica .....	66
Tabela 19: Contabilização do custo do material por m <sup>2</sup> .....	67
Tabela 20: Contabilização do custo da mão-de-obra por m <sup>2</sup> .....	68
Tabela 21: Resultados dos ensaios de compressão .....	72



Tabela 22: Contabilização do custo do material por m <sup>2</sup> .....	80
Tabela 23: Contabilização do custo da mão-de-obra por m <sup>2</sup> .....	81
Tabela 24: resultados dos ensaios de compressão .....	86
Tabela 25: Contabilização do custo do material por m <sup>2</sup> .....	93
Tabela 26: Contabilização do custo da mão de obra por m <sup>2</sup> .....	94
Tabela 27: Rotura nos elementos de madeira .....	95
Tabela 28: Resultados dos ensaios de compressão .....	98
Tabela 29: Contabilização do custo do material por m <sup>2</sup> .....	105
Tabela 30: Contabilização do custo da mão de obra por m <sup>2</sup> .....	106
Tabela 31: Resultados dos ensaios de compressão .....	110
Tabela 32: Dados de comparação .....	116

## **Capítulo 1**

### **Introdução**

# 1 Introdução

Neste capítulo encontra-se a introdução à dissertação, onde se expõe o tema em estudo incorporando-o no contexto da engenharia civil. Expõe-se também a motivação, os objectivos do trabalho e a estrutura da dissertação. Esta apresenta a história da construção com fardos de palha, em Portugal e no mundo e apresenta técnicas construtivas com a respectiva descrição, de forma sucinta.

Este trabalho propõem-se a estudar a empregabilidade da palha como material construtivo, quebrar os preconceitos associados ao uso da mesma na construção, evidenciar as suas virtudes ecológicas e caracterizar o desempenho mecânico de paredes construídas de acordo com técnicas em estudo. Para tal, construíram-se doze paredes, três exemplares de cada técnica, que posteriormente foram sujeitas a ensaios de compressão e a ensaios cíclicos horizontais no plano. Estes foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

## 1.1 Enquadramento

Desde o início da sua existência, o Homem sempre teve a necessidade de se abrigar. O termo “casa” designa, na generalidade, um edifício que serve de habitação a uma ou várias famílias. As formas e os estilos de habitação foram-se modificando ao longo da história para responder tanto a imperativos socioeconómicos, culturais como às condições climáticas. Com o aparecimento e desenvolvimento de novos métodos industriais fez com que os materiais naturais fossem menos empregues na construção civil, levando ao seu desaparecimento progressivo. Actualmente, a preocupação pelo ambiente faz com que o Homem tenha cada vez mais interesse em utilizar materiais naturais e sustentáveis como fizeram os seus antepassados nos diversos continentes. A expressão “construção ecológica” designa a concepção de edifícios que utilizam de forma razoável os recursos materiais, humanos e energéticos. Assim, a construção ecológica é sinónimo de uma construção que procura o equilíbrio entre as necessidades do utilizador e dos recursos despendidos na sua concepção e na manutenção. Como as técnicas construtivas ancestrais não foram alvo de desenvolvimento, as construções em palha continuam associadas a técnicas construtivas simples que passam pelo empilhamento dos fardos e por um revestimento de acabamento em argamassa, em

ambas as faces da parede, que lhes confere um aspecto final idêntico a outros processos construtivos.

Face às vantagens associadas a estas técnicas construtivas (paredes com fardos de palha), tem-se observado um renascimento destas construções que tem sido difundida e utilizada em diversos países (Canadá, Inglaterra, Austrália, E.U.A., França, China, etc.) pelo mundo. No entanto, existe uma elevada falta de conhecimentos sobre as construções em palha que influenciam negativamente os utilizadores, construtores na sua utilização, particularmente, em aspectos relacionados com:

- A palha atrai os roedores;
- A palha não tem durabilidade;
- A palha não apresenta uma solidez suficiente para suportar as cargas de uma construção;
- A palha é facilmente combustível;
- A palha degrada-se facilmente com a humidade.

## **1.2 Motivação**

A principal motivação por este tema é justificada pelo aumento do impacto ambiental causado pelas técnicas construtivas mais utilizadas actualmente. As construções ecológicas e sustentáveis são na actualidade uma preocupação patente nos construtores e nos utilizadores, influenciando desta forma as técnicas construtivas utilizadas.

Face à escassez de informação relativa a este tipo de construção, pretende-se com este trabalho, contribuir para o aumento do conhecimento do comportamento mecânico de paredes construídas com recurso a técnicas que utilizam fardos de palha, para no futuro contribuir na possível elaboração de um documento normativo de regulamentação sobre a construção de habitações com recurso a fardos de palha. Consequentemente, será possível garantir a estas construções os níveis de segurança e conforto actuais.

### 1.3 Objectivos do Trabalho

Com o desígnio de aumentar e aperfeiçoar o conhecimento sobre as construções com fardos de palha, propõe-se, no presente trabalho, analisar vários aspectos destas construções relacionados com as técnicas em estudo. Os aspectos estudados foram:

- Caracterização da massa volúmica dos fardos de palha;
- Avaliação da capacidade resistente das paredes quando sujeitas a cargas verticais em ensaios de compressão até à rotura;
- Avaliação do desempenho de paredes sujeitas a solicitações horizontais cíclicas no plano combinadas com carga vertical permanentes;
- Identificar e caracterizar a evolução do dano ao longo dos ensaios;
- Analisar e interpretar as dificuldades verificadas no processo construtivo por técnica em análise;
- Quantificar o custo construtivo relativamente a cada técnica empregue e demonstrar que com soluções construtivas com recurso a matérias naturais.

### 1.4 Estratégia

Para o desenvolvimento prático desta dissertação, Caracterização mecânica de paredes construídas com fardos de palha, construíram-se em laboratório doze paredes recorrendo-se a quatro técnicas construtivas. As paredes foram revestidas com uma argamassa produzida em laboratório, procurou-se que a sua composição fosse a mais ecológica possível, em concordância com este tipo de construção. Durante o processo de construção das paredes contabilizou-se o custo construtivo e apresentam-se os valores do material e da mão-de-obra. Posteriormente as paredes foram alvo de uma campanha experimental, da qual constam os ensaios de compressão e o ensaio cíclico horizontal no plano.

Por fim, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios correspondentes a cada uma das técnicas em estudos, comparam-se entre si e com os resultados dos ensaios de outros autores.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está organizada por capítulos dos quais, o primeiro capítulo faz a introdução à dissertação, incorporando-o no contexto da engenharia civil. Expõe-se também a motivação, os objectivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, expõe-se o enquadramento histórico das construções com recurso a fardos de palha, no mundo e em Portugal. São referidos alguns exemplos de edifícios construídos em palha e apresentados estudos que caracterizam o fardo de palha e as técnicas construtivas.

O capítulo 3 faz referências aos estudos realizados em laboratório sobre elementos construtivos em fardos de palha, nomeadamente a ensaios de compressão e a ensaios cíclicos horizontais no plano. Apresenta-se também, no presente capítulo os resultados dos ensaios e os respectivos comentários dos autores.

O capítulo 4 dedica-se à caracterização dos fardos de palha e ao processo de escolha da argamassa a usar no revestimento das paredes construídas. Os fardos foram qualificados relativamente às dimensões e à massa volúmica. A argamassa foi caracterizada em função das propriedades mecânicas, resistência à compressão e à flexão.

No capítulo 5, apresentam-se os sistemas e a instrumentação dos ensaios realizados na campanha experimental desta dissertação, designadamente dos ensaios de compressão e o ensaio cíclico horizontal no plano.

Os capítulos 6,7,8 e 9 são dedicados à caracterização mecânica de paredes construídas segundo as técnicas em estudo, Técnica Nebraska Armada, Técnica C.S.T (célula sob tensão), Técnica de G.R.E.B e a Técnica Abarrotar, respectivamente. Neles, é possível encontrar a descrição da técnica, do processo construtivo e a análise do custo de construção. Encontra-se também, a descrição do comportamento mecânico, a evolução do dano no decorrer dos ensaios e apresentam-se os resultados dos ensaios acompanhados das respectivas conclusões gerais.

No capítulo 10, manifestam-se as considerações finais do trabalho realizado, bem como algumas propostas para futuros estudos, no sentido de aprofundar o conhecimento da construção com recurso a fardos de palha.

## **Capítulo 2**

### **Construção com fardos de palha**

## 2 Construção com fardos de palha

Neste capítulo é retratado o desenvolvimento histórico da construção com recurso a fardos de palha, as técnicas construtivas, as potencialidades e as preocupações da mesma.

### 2.1 Construção com fardos de palha – Enquadramento Histórico

A utilização da palha como material construtivo, foi empregue na construção de habitações há milhares de anos, sendo utilizado de diversas formas, adaptando-se às correntes necessidades da época (Magwood, *et al.*, 2000).

Na América do Norte, as primeiras estruturas de palha documentadas datam desde os anos de 1800, sendo que o mais velho exemplar sobrevivente conhecido data o ano de 1903, em Alliance, Nebraska, Estados Unidos da América (figura 1). Embora o edifício tenha sido deixado ao abandono na década de 1950, ainda hoje, desabitado, resiste aos ventos forte e às grandes variações de temperatura que prevalecem na região de Nebraska. (King, 2006).



Figura 1: Burke House, Alliance, Nebraska, U.S.A, 1903 (Minke, *et al.*, 2005)



Figura 2: Simonton House, Nebraska, U.S.A, 1908 (Baindridge, 1994)

Com o desenvolvimento dos processos agrícolas e com a introdução de meios mecânicos, (produção de fardos de palha rectangulares), os colonos europeus da região de Nebraska Sand Hills viram nos fardos de palha a solução para a construção das suas habitações, uma vez que a região era desprovida de madeira (material mais utilizado na construção) (Magwood, *et al.*, 2000). No início, as construções com fardos de palha



eram pouco mais do que empilhamento dos mesmos, de forma desencontrada, que posteriormente eram rebocados constituindo assim paredes estruturais que suportariam as coberturas (King, 1996).

Durante os finais dos anos 1800 e início dos anos 1900, na região de Nebraska Sand Hills foram erguidas 70 habitações em fardos de palha. Algumas destas construções atestam a longevidade destas técnicas construtivas, ao sobreviverem até à actualidade (Lerner, *et al.*, 2000).

Na Europa, a primeira construção foi edificada em França, na região de Montargis no ano de 1921. Foi construída com o propósito de ser um protótipo para a reconstrução do país, após a primeira guerra mundial. Encontra-se, actualmente num bom estado de conservação, o que comprova a durabilidade e a viabilidade da utilização da palha como material de construção.



Figura 3: Casa La feuillette, França (Montargis);

Fonte: [www.revolution-lente.coerrance.org](http://www.revolution-lente.coerrance.org)

No entanto, o sucesso da palha como material de construção foi declinando até cair em desuso. Este acontecimento deveu-se ao desenvolvimento da indústria da construção que proporcionou a construção das ferrovias e rodovias por todo o mundo que deu capacidade de transporte da madeira que até não existia. A indústria da construção mudou e os materiais mais populares e conhecidos hoje em dia (Madeira, Pedra, Aço e Betão) tornaram-se nos materiais de eleição (Vardy, 2009). Estatuto que permaneceu por muitos anos, começando a alterar-se na década de 1970 (Lerner, *et al.*, 2000).

Com o impacto causado pela construção civil no meio ambiente, as sociedades actuais procuram formas alternativas de construção e, consequentemente, materiais plausíveis de minimizar o impacto ambiental. Esta modificação de pensamento conduziu à

redescoberta da construção com fardos de palha como sendo uma alternativa sustentável (Vardy, 2009). Este tipo de construção continuou a ganhar mais adeptos entre os anos de 1980 a 1990, mas foi no início do milénio que esta tecnologia se disseminou por todo o mundo, com um crescimento contínuo (Vardy, 2009).

## 2.2 Construção com fardos de palha em Portugal

Em Portugal, a construção em fardos de palha é pouco difundida e muito recente existindo ainda poucos exemplares. Estes podem ser encontrados na comunidade de Tamera (distrito de Beja), na Quinta dos Melros (distrito de Coimbra) e no Parque Natural de São Mamede (distrito de Portalegre) e foram construídos na última década.

A comunidade de Tamera, situada na localidade de Monte do Cerro, concelho de Castro Verde e distrito de Beja, construiu alguns edifícios em fardos de palha entre eles, um auditório, a casa de três arcos e habitações.

O auditório (figura 4) é a maior construção em palha da península ibérica. Este edifício possui uma estrutura porticada de madeira que suporta todos os esforços. As paredes, com oito metros de altura, foram erguidas com fardos de palha e posteriormente rebocadas com argamassas de argila em ambas as faces. Na face exterior, a mistura contém ainda cal para protecção contra as intempéries.



Figura 4: Auditório construído com fardos de palha em Tamera (Beja)

Fonte: [www.tamera.org](http://www.tamera.org)

A casa dos três arcos (figura 5) foi construída de forma diferente em relação ao auditório, neste caso a palha é utilizada como elemento estrutural. Este facto deve-se ao padrão de arquitectura em causa que contempla três arcos. Deste modo, o método

construtivo apresenta um processo muito semelhante ao utilizado nos arcos em pedra. Os fardos foram produzidos por uma enfardadeira específica que possui a capacidade de os produzir com ângulos consoante as necessidades.



Figura 5: Casa dos 3 arcos em Tamera (Beja)

Fonte: [www.tamera.org](http://www.tamera.org)

No Parque Natural de São Mamede, concelho de Marvão do distrito de Portalegre, encontram-se uma construção com fardos de palha (figura 6) licenciada pela Câmara. Trata-se de uma habitação destinada ao turismo rural com uma área de noventa metros quadrados. Nesta construção, foi utilizada uma estrutura porticada de madeira tendo sido esta colocada do lado interior das paredes. Os fardos de palha foram aplicados nas paredes e na cobertura desempenhando assim funções de enchimento e isolamento térmico e acústico.



Figura 6: Casa de turismo rural (Concelho de Marvão)

Fonte: [www.terrapalha.blogspot.com/2009/08/habitacao-em-fardos-de-palha.html](http://www.terrapalha.blogspot.com/2009/08/habitacao-em-fardos-de-palha.html)

Na Quinta dos Melros, a habitação (figura 7) construída em palha encontra-se em fase de acabamentos (execução do revestimentos) e a técnica utilizada para a edificação baseia-se na técnica “Nebraska”. Como já foi referido anteriormente, esta técnica emprega as paredes como sustento da estrutura. No entanto, no caso da Quinta dos Melros, é empregue uma estrutura de madeira de modo a suportar parte dos esforços fomentados pelo piso superior.



Figura 7: Casa em palha (Quinta dos Melros)

Fonte: [www.quintadosmelros.org](http://www.quintadosmelros.org)

## 2.3 Palha como material de construção

Este subcapítulo apresenta os vários tipos de palha usada na construção, os tipos de fardos e as possíveis formas de assentamento, exhibe também a ficha técnica dos fardos de palha.

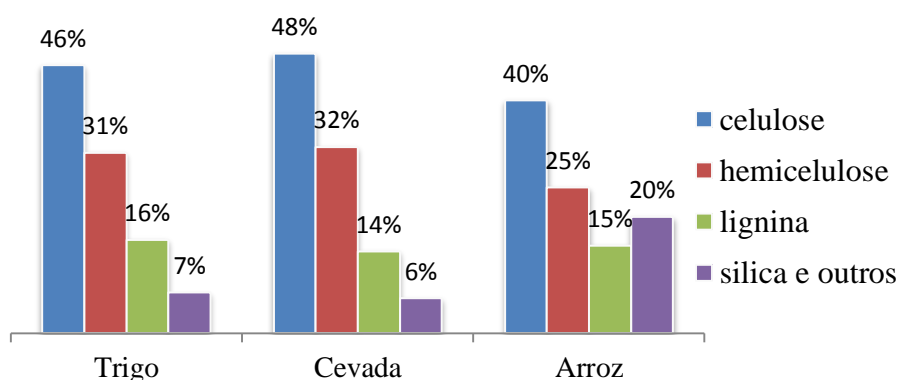
### 2.3.1 Propriedades da palha

A palha define-se como sendo a parte do talo tubular de certas gramíneas, chamadas vulgarmente de cereais (trigo, cevada, aveia, centeio, arroz), cortada aquando a ceifa e rejeitada após ser liberta das respectivas sementes (Summers, *et al.*, 2003). Devido à sua forma tubular (figura 8) a sua constituição possui 10% de matéria vegetal e 90% de ar (Summers, *et al.*, 2003). A estrutura da fibra é composta por um fio de celulose ligado por uma matriz de hemicelulose, lignina e sílica (Summers, *et al.*, 2003).



Figura 8: Talo tubular da palha

Do ponto de vista da construção de habitações com fardos de palha, parece haver pouca diferença de qualidade dos fardos entre a palha de trigo, cevada, aveia e centeio (Bouter, *et al.*, 2009). Nas construções em palha a diferença nas propriedades mecânicas e físicas da construção não são influenciadas pelas diferentes origens/espécies de palha (Bouter, *et al.*, 2009). No entanto, dois factores incitam a privilegiar a palha de arroz pela sua elevada taxa de sílica que a torna mais resistente ao apodrecimento e pela sua superfície ligeiramente eriçada que assegura uma maior coesão entre partículas e por sua vez, entre os fardos (Bouter, *et al.*, 2009). Na figura 9 é possível observar a composição da palha de trigo, cevada e arroz.

Figura 9: Composição da palha segundo o tipo de cereal (trigo, cevada e arroz), adaptado de Bouter, *et al.*, 2009

A celulose é um hidrato de carbono complexo, composto por glicose que constitui a principal componente da parede celular das plantas que por sua vez lhe confere rigidez as suas paredes (Bigland, *et al.*, 2005).

A hemicelulose é constituída por glicose e açúcar. (Clynes, 2009)

A lignina é uma parte integrante da parede celular da palha. Como é um polímero não hidratado, é muito resistente à deterioração biológica (Jenkins, 2005) citado por (Clynes, 2009) sendo apenas atacada por fungos de podridão branca. As ligações cruzadas que ocorrem entre a lignina e a celulose provocam um endurecimento e fortalecem as paredes celulares, originando uma barreira contra a absorção de água. As outras ligações cruzadas que ocorrem entre a lignina e os outros componentes minoram a acessibilidade por parte de enzimas microbianas à celulose e hemicelulose, o que contribui para retardar a degradação do talo de palha, fazendo com que a taxa de degradação microbiana seja diminuta (Clynes, 2009).

A sílica é um substancia inorgânica absorvida pelas plantas como ácido silício ( $\text{SiOH}_4$ ). Este impregna-se através da água e acumula-se entre as células vivas, fornecendo à estrutura resistência a pragas naturais (Clynes, 2009). A quantidade de sílica presente em cada planta depende, das condições ambientais de crescimento independente da espécie da planta. (Myhrman, *et al.*, 1993), (Archer, 2004). No arroz a absorção de sílica tem demonstrado que proporciona alguns benefícios, maior resistência a pragas e maior tolerância a metais pesados (Kobayashi, *et al.*, 2006).

### **2.3.2 Fardos de palha**

Os fardos utilizados na construção resultam da compressão da palha com uma geometria normalmente rectangular cujas dimensões variam consoante a enfardadeira utilizada.

Um fardo de qualidade para a construção civil deverá apresentar essencialmente as seguintes características: deve ser isento de humidade; deve ser composto por “hastes” rígidas e flexíveis; deve estar bem comprimido e ter um tamanho aproximadamente uniforme. Os fardos que apresentarem zonas cinzentas ou pretas, onde os esporos de bolor começaram a proliferar são indicadores de que os fardos estiveram sujeitos a um ambiente com condições de humidade variáveis, e por tal, deverão ser rejeitados para a construção de habitações. Pelas suas características e se usada de forma cuidada, a palha é um material com grande potencial devido à sua durabilidade, ao seu poder isolante, à sua elevada disponibilidade e ao seu baixo custo.



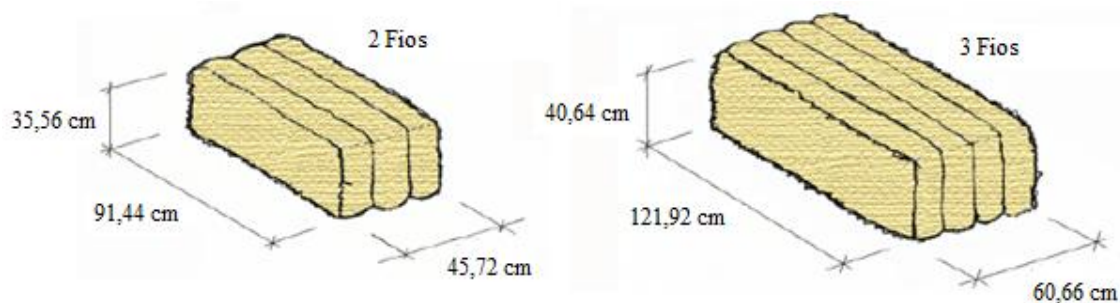


Figura 10: Tipos de fardos utilizados na construção

Fonte: [www.strawbale.com](http://www.strawbale.com)

Os fardos, independentemente da sua dimensão podem ser assentes de duas formas, de “*flat*” e de “*edge*”. Os fardos dispostos de “*flat*” encontram-se assentes sobre a base de maior área (figura 11). Os fardos de “*edge*” encontram-se assentes sobre a face com maior comprimento e de menor largura (figura 12).



Figura 11: Fardo assente de “*Flat*”



Figura 12: Fardo assente de “*Edge*”

Nos últimos 20 anos, os fardos de palha foram sujeitos a inúmeros ensaios que contribuíram para a elaboração de uma ficha técnica (tabela 1), que todo e qualquer material não dispensam.

Tabela 1: Ficha técnica dos fardos de palha, adaptado de Krumm, *et al.*, 2009

Tipo de palha	Arroz, cevada, Trigo, etc..		
Composição	Celulose, Hemicelulose, Lignina, Sílica e outros		
Dimensões (cm)	120/240 ±50	h=80	fardo de dimensão grande
	80/200 ± 50	h=80	fardo de dimensão média
	50/90 ± 10	h=80	fardo de dimensão pequena
Comprimento das fibras	≥ 25cm		
Densidade (kg/m³)	250	Para os fardos grandes e médios	
	100 ±10	Para os fardos pequenos	
Resistência das cordas	10 Vezes superior à carga exercida sobre o fardo		
Condutibilidade Térmica [λ] em (W/m.°C)	0,044	Fibras na vertical	
	0,064	Fibras na horizontal	
Capacidade higroscópica	12-14%	Fardo seco	
	20%	Máximo admissível	
	28%	Fibras saturadas	
Resistência ao fogo	F90	Normalmente inflamável	
Coeficiente de resistência ao vapor de água [μ]	2-2,5		
Performance acústica (dba)	Rw = 53	Melhor qualidade que os isolantes <i>standarts</i>	
Módulo de elasticidade [ε] em (N/mm²)	0,5- 0,55	Para paredes de fardos grandes não rebocados	
	~1,0	Para paredes de fardos pequenos rebocados	
Capacidade de carga (t/m²)	25,5	Para fardos grandes não revestidos	
	~7-8	Em paredes constituídas por fardos pequenos	

## 2.4 Técnicas Construtivas

Actualmente, inúmeros detalhes e sistemas construtivos são utilizados nas construções com fardos de palha. A escolha de uma técnica construtiva em detrimento de uma outra está relacionada com vários critérios entre os quais podem ser destacados a tipologia do edifício a construir, o número de andares, a performance térmica desejada, a arquitectura, o custo, e as características da envolvente da edificação (tipo de solo, condições climáticas, etc.).

As técnicas de construção com fardos de palha encontram-se divididas em dois grupos, sendo um das técnicas de fardos de palha portadores e o outro das técnicas de fardos de palha não portadores. Esta distinção está relacionada com a função que o fardo de palha



assume em cada técnica. Nas técnicas de palha portadores os fardos desempenham funções estruturais, nas técnicas não portadoras os fardos, apenas conferem características térmicas e acústicas (Bouter, *et al.*, 2009).

### 2.4.1 Técnica de fardos de palha portadores

A este grupo pertence a técnica original da construção com fardos de palha, técnica de Nebraska (figura 13), que foi criada e desenvolvida pelos colonos europeus na região de Nebraska nos E.U.A. É a mais simples e a mais limitada, pois só permite erguer um número limitado de pisos, no máximo 3 pisos, conhecidos até hoje (Krumm, *et al.*, 2009). Nesta técnica, a palha, além de assegurar as características térmica e acústica do edifício, assume também as funções estruturais. Estas são concebidas como se de um assentamento de alvenaria se tratasse mas, sem qualquer argamassa de ligação entre as fiadas de fardos. A ligação das sucessivas fiadas é conseguida pela aplicação de estacas ou pregos de madeira, bambo ou de aço. Em cada fardo, são aplicadas duas estacas com uma profundidade aproximada de dois fardos e meio, para que a ligação entre os fardos seja mais eficaz, melhorando a performance da parede. Nas primeiras três fiadas, a aplicação dos pregos não se processa e depois realiza-se em todas de igual modo.

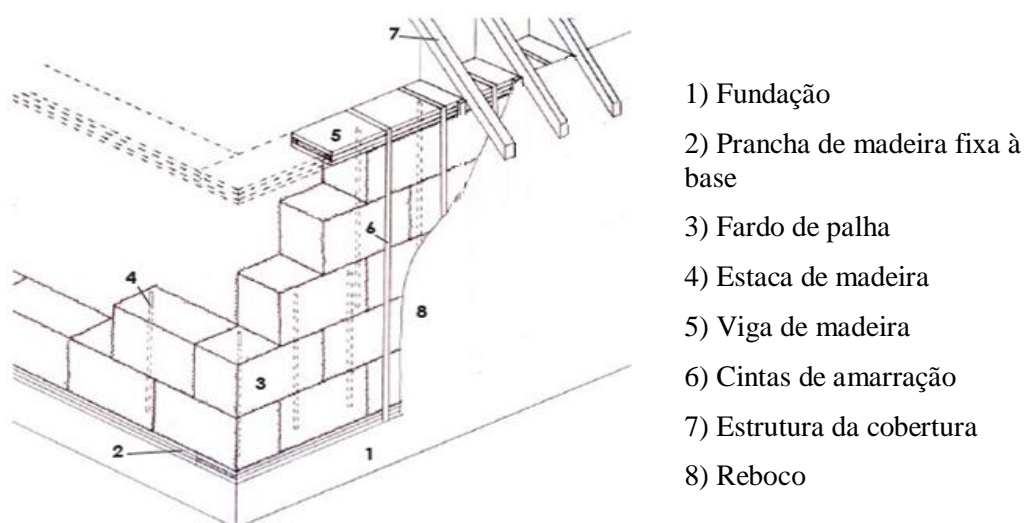


Figura 13: Esquema construtiva da técnica de Nebraska, adaptado de Krumm, *et al.*, 2009.

### 2.4.2 Técnicas de fardos de palha não portadores

São assim designadas todas as técnicas construtivas em que os fardos de palha não suportam qualquer tipo de esforço, para além do peso próprio. São utilizados apenas como material de enchimento e desempenham funções térmicas e acústicas. A resistência aos esforços é garantida por uma estrutura, normalmente executada em madeira. Com esta estrutura, a construção com fardo de palha ganha capacidade de edificação em altura.

#### 2.4.2.1 Estrutura porticada de madeira

A estrutura porticada de madeira pode ser colocada no interior da parede ou nas faces exterior e/ou interior da mesma, ver figura 14.

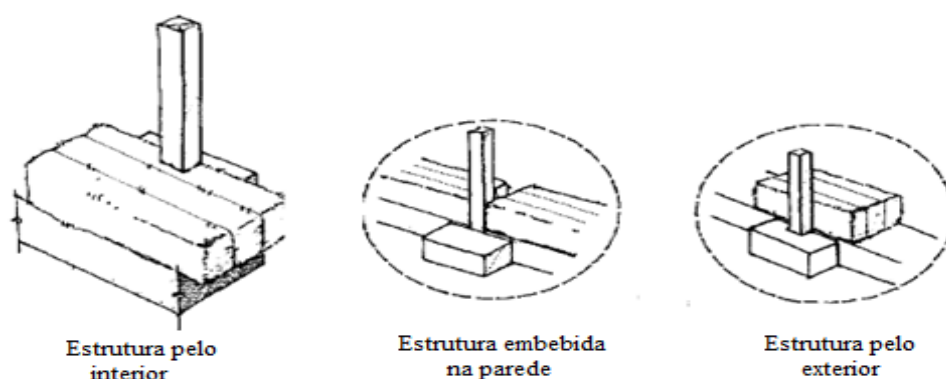


Figura 14: Disposições da estrutura porticada de madeira, adaptado de Macdonald, 2003.

A posição mais adequada para a estrutura é pelo interior da parede, assim a madeira fica mais protegida da humidade e dos agentes biológicos, facilita o assentamento dos fardos tornando este processo mais rápido porque se evitam os inúmeros cortes dos fardos de palha (Macdonald, 2003). Por outro lado, quando existem fardos de palha danificados ou portadores de patologias (fungos, podridão...), estes podem ser retirados, substituídos sem afectar a estrutura da habitação (Palmer, 2009). A figura 15 mostra o posicionamento da estrutura e o assentamento dos fardos pelo exterior.

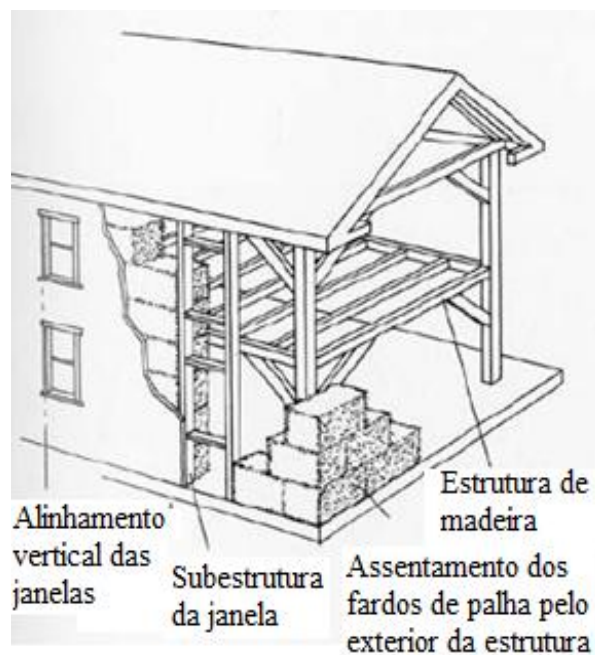


Figura 15: Ilustração da construção em fardos de palha com estrutura porticada de madeira, adaptado de Chiras, 2004.

#### 2.4.2.2 Técnica de G.R.E.B (Groupe de Recherches Ecologiques de la Battur)

A técnica de G.R.E.B, que se encontra ilustrada na figura 16 foi desenvolvida no Canadá e nos dias de hoje é empregue na auto-construção (habitações construídas pelos próprios donos de obra). Esta técnica é executada através da combinação de vários materiais. A palha em fardos serve como material de enchimento da estrutura tridimensional de madeira, os vários elementos que a constituem são ligados por ligações do tipo cavilha. Os elementos verticais resistentes de madeira, exteriores e interiores são ligados entre si por tirantes, estes são aplicados após o assentamento de cada fiada de fardos de palha (Arnaud, *et al.*, 2009).



Figura 16: Ilustração da Técnica de G.R.E.B, adaptado de Brossamain, *et al.*, 2006.

#### 2.4.2.3 Célula Sob Tensão C.S.T (Cellules Sous Tension)

Esta técnica consiste na construção de células sob tensão (figura 17), onde a palha assume um papel importante que vai além da térmica e da acústica desempenhando funções de contraventamento. O fardo de palha sofre um suplemento de tensão quando é colocado entre os elementos de madeira, horizontais e verticais. Os elementos verticais servem de suporte às cargas verticais e de fixação dos elementos longitudinais. O afastamento entre os diversos elementos verticais está relacionado com as dimensões do fardo a utilizar (5cm inferior que o comprimento do fardo) e desta forma, garante o suplemento de tensão pretendido. A largura destes elementos deve ser inferior à largura do fardo, de modo a garantir que a madeira fica recuada relativamente à face da parede, evitando pontes térmicas. Os elementos horizontais de pequena dimensão são pregados longitudinalmente em ambos os lados da parede e no fim de cada fiada de fardos. A aplicação destes elementos é precedida pela compressão dos fardos.

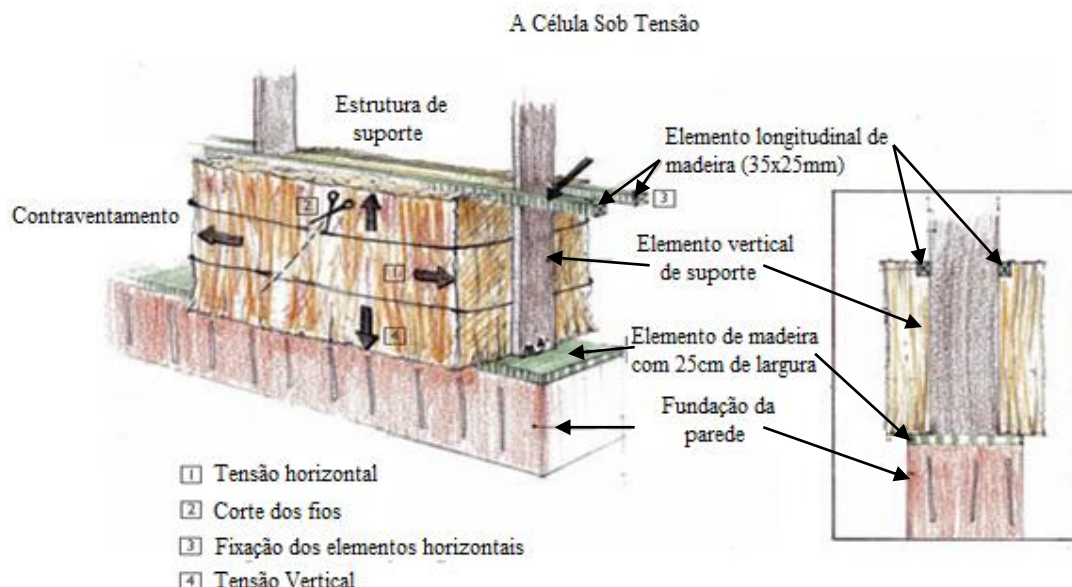


Figura 17: Ilustração da Célula sob Tensão - Técnica C.S.T, adaptado de <http://www.habitatvegetal.com/assets/docs/entrepailleetterre.pdf>

## 2.5 Revestimento das paredes

As paredes resultantes da construção com fardos de palha são revestidas, na sua maioria com recurso a argamassas que poderão ser de base de cimento, de cal aérea, de cal hidráulica, de terra e bastardas (argamassas constituídas por mais que um ligante).

No caso da construção em palha, as argamassas, além de colmatarem os vazios e as irregularidades dos fardos protegem ao mesmo tempo as paredes da humidade e dos insectos ou outros invasores indesejáveis (Bouter, *et al.*, 2009). Devem ser aplicadas em camada suficientemente espessa de modo a não persistirem falhas que poderiam, em muito, diminuir as qualidades isolantes da palha ou permitir a infiltração de água (Bouter, *et al.*, 2009).

As argamassas possuem também um papel fundamental na performance global e na longevidade, durabilidade de uma parede em fardos de palha. Protegem das degradações provocadas pela chuva, pelo vento, pelo fogo e por animais potencialmente prejudiciais. Além deste propósito, as argamassas também desempenham um papel estrutural importante suportando as cargas verticais e as forças horizontais (Bouter, *et al.*, 2009).

A argamassa ideal para o revestimento de uma parede em fardos de palha deverá possibilitar a respiração da palha, isto é, a argamassa deverá ser permeável ao vapor de

água (Bouter, *et al.*, 2009). Dito isto, nem todas as argamassas facultam este processo e há que ter cautela na escolha das argamassas aquando a construção de uma casa em palha para otimizar a sua durabilidade e longevidade no tempo.

## **2.6 Vantagens e desvantagens da construção com fardos de palha**

Neste tipo de construção, como em qualquer outra existem vantagens e desvantagens na sua utilização, que são aqui mencionadas.

### **2.6.1 Vantagens**

As habitações erguidas com recurso a fardos de palha possuem grande capacidade de isolamento, que se deve à espessura das paredes e à baixa condutibilidade térmica da palha (Magwood, *et al.*, 2000). As paredes em fardos de palha também proporcionam uma superfície contínua, evitando assim os pontos térmicos (Magwood, *et al.*, 2000). Em comparação com materiais minerais de construção, como o tijolo, o valor da condutibilidade térmica dos fardos de palha sofre uma influência muito menor da humidade (Minke, *et al.*, 2005). No entanto, uma habitação construída com paredes de outro tipo de material e de igual espessura pode oferecer a mesma capacidade isolante mas com custos mais elevados (Magwood, *et al.*, 2000).

A palha, ao contrário dos outros materiais de construção possui a capacidade de armazenar dióxido de carbono, pelo processo de fotossíntese, em quantidades superiores ao que é produzido na realização das sementeiras do cereal, na produção dos fardos de palha e no transporte dos mesmos (Minke, *et al.*, 2005).

O processo de construção de casa com fardos de palha é simples e acarreta um custo de construtivo inferior ao de uma construção convencional mas, o custo depende de vários factores, do tipo de técnica usada (técnicas de fardos de palha portadores ou técnicas de fardos de palha não portadores) e se contrata ou não mão-de-obra (Chiras, 2004). Normalmente, o custo de uma parede em fardos de palha é um quarto do custo de uma parede convencional, de características comparáveis (Magwood, *et al.*, 2000).

A resistência ao fogo de uma parede em fardos de palha revestida com uma argamassa é de 90 minuto, pertence à classe F90 de resistência ao fogo, no entanto, o fogo é um

perigo real durante a construção de uma habitação devido à existência de palha solta no estaleiro de obra (Minke, *et al.*, 2005). Pala além da resistência ao fogo por parte das paredes rebocadas, os fardos de palha por si só são naturalmente resistentes ao fogo, desde que a produção dos mesmo tenha sido cuidada e com compressão adequada, que reduz de forma substancial a presença de oxigénio nos fardos (Magwood, *et al.*, 2000).

A este tipo de construção são lhe associados vários medos, como por exemplo, dos vermes, dos insectos e dos roedores que são infundados, uma vez que os roedores não procuram a palha para se alimentarem mas sim para nidificar. Um revestimento executado correctamente é capaz de impedir a entrada dos roedores, dos insectos e dos vermes para o corpo da parede (Minke, *et al.*, 2005). O caruncho, também é um dos receios, e já foi encontrado numa habitação em fardos de palha mas apenas atacou as secções de madeira (Minke, *et al.*, 2005).

A nível estrutural, a alta ductilidade dos fardos de palha faz com que seja uma material apropriado para zonas de elevado risco sísmico, uma vez que é capaz de absorver a energia cinética libertada durante a ocorrência de um sismo (Minke, *et al.*, 2005). Graças a essa capacidade, casas em fardos de palha são uma solução de habitação para as pessoas afectadas pelo sismo do dia 12 de Maio de 2008, na província de Sichuan na China (McGill, 2009).

È importante referir, que as hipotecas e os planos de seguros estão disponíveis para casas em fardos de palha, nos Estados Unidos e o mercado de habitação para este tipo de construção é respeitável (Chiras, 2004).

### **2.6.2 Desvantagens**

A palha que incorpora os fardos resulta da produção dos cereais, que geralmente utilizada pesticidas durante o processo de crescimento das plantas. A palha utilizada na construção deixa de fornecer nutrientes ao solo que a produz (Chiras, 2004). Além disso, os fardos de palha de menor dimensão são difíceis de encontrar, porque a maioria dos produtores enfardam a palha em fardos ou em rolos de grandes dimensões (Minke, *et al.*, 2005). Os fardos de palha diferem em tamanho e em valores de humidade, isto porque os fardos produzidos no período da manhã possuem maior ter de humidade e devem ser deixados a secar (Minke, *et al.*, 2005). As ervas daninhas presentes na sementeira são um problema, porque vão fazer parte dos fardos de palha e como

possuem um processo de degradação mais rápido do que a palha podem comprometer a integridade das paredes (Minke, *et al.*, 2005).

As habitações em fardos de palha não são adequadas para climas húmidos. Se não forem construídas correctamente, a humidade pode penetrar, instalar-se e causar o aparecimento de fungos para níveis elevados de humidade, consequentemente originar a degradação das paredes. Um fardo de palha contém um teor de humidade inferior a 15%, para evitar que esse ter aumente é necessário que a argamassa utilizada no revestimento exterior seja permeável ao vapor de água (Minke, *et al.*, 2005).

Relativamente à realização da regularização das paredes em fardos de palha é mais demorada e consome uma quantidade de argamassa superior do que uma parede de tijolo (Minke, *et al.*, 2005).

A instalação de hidráulicas tem de ser bem executadas, porque uma rotura numa das redes pode provocar danos com custo de reparação elevados (Minke, *et al.*, 2005).



## **Capítulo 3**

### **Anteriores caracterizações mecânicas de sistemas construtivos com fardos de palha**

### 3 Anteriores caracterizações mecânicas de sistemas construtivos com fardos de palha

Para que o desenvolvimento, expansão e crescimento deste tipo de construção seja constante e sólido, é necessário compreender o seu comportamento/desempenho mecânico. Este conhecimento é necessário e essencial, uma vez que é imperativo que a segurança dos utilizadores deste tipo de estruturas seja garantida, independentemente da tipologia da edificação e das condições de perigosidade ambiental da região onde se insere. Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento de trabalhos científicos nesse domínio, nomeadamente, ensaios de compressão e ensaios cíclicos horizontais ao plano e para fora do plano, em elementos construtivos.

#### 3.1.1 Ensaios de compressão em fardos de palha não rebocados.

Vários autores realizaram ensaios de compressão em fardos de palha não rebocados e determinaram o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Os ensaios foram realizados sobre fardos de palha de trigo, cevada e aveia, de dois e três fios assentes de “flat” e de “edge”. Os resultados obtidos pelos vários estudos são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos ensaios (Bou-ali, 1993), (Watts, *et al.*, 1995), (Zhang, 2002) e (Ashour, 2003)

Autores	Tipo de palha	Tipo de fardo	Posição do fardo	Módulo de elasticidade [MPa]	Coeficiente de Poisson	
Bou-Ali, 1993	Trigo	3 Fios	<i>Flat</i> <i>Edge</i>	0,7 - 2,4 0,67	0,30	
Watts <i>et al.</i> , 1995	Trigo, cevada, aveia	2 Fios	<i>Flat</i>	0,083 - 0,237	Longitudinal	0,37
					Lateral	0,11
Zhang, 2002	Trigo	2 Fios	<i>Flat</i> <i>Edge</i>	0,31 0,46	-----	
Ashour, 2003	Trigo	2 Fios	<i>flat</i> <i>Edge</i>	0,10 - 0,80 0,05 - 0,55	0,28 - 0,44 0,12 - 0,35	

### 3.1.2 Ensaios de compressão em paredes de fardos de palha não rebocadas

Em 1993, Bou-ali, 1993 construiu 3 paredes em fardos de palha de 3 fios, com 3,6m de comprimento por 2,4m de altura. Foram carregadas até uma força máxima de 70kN o que perfaz uma carga de 19 kN/m. Os autores mencionam o facto que não terem utilizado qualquer elemento de contraventamento, evitando assim valores conservativos da deformação. No entanto, foram aplicadas “estacas” com diâmetro com espaçamento não especificado que atravessavam os fardos na orientação vertical. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.

Tabela 3: Resultados do ensaio, Força/Deslocamento (Bou-ali, 1993)

Parede	Força [kN/m]	Deslocamento [cm]
A	19,2	17
B	19,2	19
C	19,2	20

Em 2002, (Blum, 2002) realizou ensaios de compressão em 4 paredes, com 2,30m de comprimento por 1,60m de altura. Das quais, duas foram construídas com fardos de palha de arroz assentes de “*edge*” designadas por parede A e B. As paredes D e C foram erguidas com fardos de palha de aveia assentes de “*flat*”. Os resultados dos ensaios encontram-se na tabela que se segue.

Tabela 4: Resultados do ensaio (Blum, 2002)

Parede	Força [kN/m]	Deslocamento vertical [cm]	Deslocamento horizontal [cm]
A	5,2	7	20
B	4,2	7,5	8
C	11	16,5	2,5
D	7	15	5

Em 2004, (Walker, 2004) realizou ensaios de compressão em cinco paredes com 1m de comprimento, 2,25m de altura e com 0,5m de largura. As paredes tiveram o mesmo sistema construtivo, designado como normal que consistiu no assentamento

desencontrado dos fardos de palha e na aplicação de estacas de madeira com 25 a 50mm de diâmetro ao centro de cada fardo na orientação vertical. Este sistema sofreu algumas alterações como se pode constatar na tabela 5. A parede 2, antes de ser sujeita ao carregamento axial sofreu uma pré-compressão até deformar 1% da sua altura. A quinta também sofreu pré-compressão e foi rebocada com uma argamassa de cal hidráulica. O reboco tinha em média 40mm, e apresentou uma resistência à compressão de 2,9 MPa aos 29 dias. Na tabela 5, são apresentados os resultados do ensaio e as alterações ao sistema construtivo das paredes.

Tabela 5: Resultados do ensaio (Walker, 2004)

Parede	Tipo de parede	Força [kN/m]	Deslocamento vertical [cm]
1	Normal	28	22
2	Pré-compressão	19	12
3	Com meios fardos	11	14
4	Sem estacas	12	17
5	Pré-comprimida e rebocada	41	5,5

### 3.1.3 Ensaio de compressão sobre fardos de palha rebocados

Em 2002, (Zhang, 2002) utilizou na sua investigação fardos de palha de arroz de dois fios, revestidos e não revestidos, com densidade de  $100\text{kg/m}^3$ . Foram testados de “*flat*” e de “*edge*” e a carga foi aplicada de diferentes formas; aplicada directamente sobre a alma do fardo não revestido; aplicada sobre a alma do fardo revestido garantido que o reboco não era carregado por último, a carga foi aplicada sobre o fardo e o revestimento. Dos resultados foi possível apurar, que a adesão da argamassa aos fardos é substancialmente diferente entre os dois modos de assentar os fardos e que os fardos devem ser comprimidos cerca de 3 a 4% da altura antes da execução do reboco.

Em 2003, (Mar, 2003) testou fardos de palha de arroz rebocados. Recorrendo a várias argamassa na realização do reboco, este foi reforçado com diferentes tipos de rede, como se pode constatar na (tabela 5). A carga de compressão foi aplicada na face de maior área e os resultados encontram-se na tabela 5.

Tabela 5: Resultados do ensaio (Mar, 2003).

Fardo de palha	Força [kN]	Tipo de Argamassa	Tipo de Rede
A	12,5	Cimento/cal	Metálica, 5 x 5cm
B	10,5	Terra + forte dose de palha	Fibra de coco
C	7	Terra+ fraca dose de palha	Fibra de coco

Em 2004, Walker (Walker, 2004) tinha como objectivos compreender a diferença do comportamento mecânico entre os fardos rebocados assentes de “*flat*” e de “*edge*”, analisar o contributo do reboco e qual a influência da espessura do mesmo na resistência à compressão. Os ensaios de compressão foram realizados em fardo de palha de, arroz, de aveia e de cevava. Com estes ensaios concluiu, que a espessura e a resistência da argamassa são os factores que mais contribuem para a resistência à compressão.

#### 3.1.4 Ensaaios de compressão em paredes de fardos de palha rebocadas.

Em 1996, Platts (Platts, *et al.*, 1996) construiu um provete com 7 fardos empilhados uns em cima dos outros, com as seguintes dimensões 36x46x(81-94) cm. Antes de executarem o reboco de 2cm de espessura com argamassa bastarda, à base de cimento e cal, foi exercida uma carga de 10kN que provocou a redução de 7,6cm, cerca de 3% da altura da parede. Foi também aplicada uma rede hexagonal com 0,8mm de diâmetro, nas duas faces da parede. Os resultados obtidos do ensaio são expostos na tabela 6.

Tabela 6: Resultados do ensaio (Platts, *et al.*, 1996).

Força	Deslocamento vertical	Força Max.	Deslocamento vertical
Carga de serviço calculada para 2 pisos		Carga admissível para o ensaio	
43 KN/m	1mm	66 KN/m	3mm

Em 1998, Carrick (Carrick, *et al.*, 1998) realizou ensaios de compressão sobre 3 provetes com 3,60m de comprimento, 2,80m de altura e 45cm de largura, erguidos com fardos de palha de arroz. Os provetes foram comprimidos em 10 a 20cm da altura inicial antes da aplicação da rede de malha hexagonal com fio de diâmetro de 1mm. A

argamassa utilizada na execução do reboco era composta por cimento, cal e areia à proporção 2:1:8. Os resultados encontram-se na tabela 7.

Tabela 7: Resultados do ensaio (Carrick, *et al.*, 1998)

Parede	Força rotura [kN]	Deslocamento [mm]
A	24	7,5
B	21	Não indicado
C	21	4,5

Em 1999, Ruppert (Ruppert, *et al.*, 1999) realizou ensaios de compressão até à rotura sobre nove paredes, três de cada tipo construídas com fardos de palha de cevada. Foram revestidas com argamassa e cada parede tinha 3,7m de comprimento por 2,4m de altura. A argamassa utilizada foi aplicada em duas camadas e era constituída por cimento, cal hidratada e por areia com a relação em volume de 1:1:4. O reboco teve um período de secagem de 40 dias, atingindo resistência à compressão de 6,9MPa. A carga de ensaio foi aplicada de forma linear, em conformidade com a norma ASTM E\_72 e os resultados encontram-se na tabela 8.

Tabela 8: Resultados do ensaio (Ruppert, *et al.*, 1999)

Parede	Tipo de parede	Força de Rotura (Média de 3 provetes)	Deslocamento (Média de 3 provetes)
A	60cm de largura, fardos de cevada; argamassa reforçado com polipropileno	47 kN/m	23mm
B	60cm de largura, fardos de cevada, rede de reforço de malha hexagonal	52 kN/m	12mm
C	45cm de largura, fardos de cevada, rede de reforço de polipropileno	90 kN/m	11mm

Em 2002, Dreger (Dreger, *et al.*, 2002) ergueu duas paredes com 2,3m de comprimento por 2,4m de altura com fardos de palha de aveia de dois fios, com 6 fiadas cada. Foram

reforçadas com uma rede metálica amarrada aos fardos com fios de polipropileno de 40 em 40cm. Rebocadas com uma argamassa de cimento, cal, e areia na proporção de 1:1:4, aplicada em duas camadas com intervalo de dois dias entre elas. O ensaio foi realizando ao fim de 7 dias de cura, obtendo-se os resultados expressos na tabela 9.

Tabela 9: Resultados do ensaio (Dreger, *et al.*, 2002)

Parede	Força de rotura [kN/m]	Deslocamento vertical [cm]	Deslocamento horizontal [cm]
A	28	3	3,5
B	29	0,3	0,6

Em 2002, Faine (Faine, *et al.*, 2002) focou-se especialmente em avaliar a capacidade resistente de carga das paredes, quando o carregamento ocorre apenas sobre os fardos de palha. Para o efeito construíram duas paredes recorrendo a fardos de palha de trigo, de dimensões 85x45x35cm<sup>3</sup>. Antes da aplicação da argamassa de revestimento as paredes foram comprimidas 20cm. As propriedades das paredes testadas são apresentadas na tabela 10 e os resultados da campanha experimental podem ser visto na tabela 11.

Tabela 10: Propriedades das paredes, adaptado de Faine, *et al.*, 2002

Parede	Dimensões	Argamassa	Espessura do revestimento	Estacas
A	4,0x2,6m <sup>2</sup>	Argamassa de cimento, cal hidratada e areia à proporção de 1:1:8	58mm	De aço de 12mm de diâmetro, com espaçamento de 0,60m e com um comprimento de 1,20m
B	2,7x2,6m <sup>2</sup>	Argamassa de cal hidratada, terra e areia à proporção de 1:3:3	40mm	Não aplicado

Tabela 11: Resultados do ensaio (Faine, *et al.*, 2002)

Parede	Carga limite em regime elástico [kN/m]	Deslocamento vertical [cm]	Carga de rotura [kN/m]	Deslocamento horizontal [cm]
A	28	3	47	11
B	18	1	36	18

### 3.1.5 Ensaios cíclicos de carga horizontal no plano

Em 2003, Ash (Ash, *et al.*, 2003) realizou ensaios cíclicos horizontais ao plano em seis paredes, parede A, B, C, D, E, F. Todas as paredes possuíam as mesmas características, relativamente às dimensões, 2,4m de comprimento por 2,4m altura e com o mesmo tipo de assentamento dos fardos de palha, este foi desencontrado e ocorreu sobre a face de maior área. No entanto, a argamassa do revestimento com 4cm de espessura foi deferente, uma vez que a parede A, B e C foi realizado com uma argamassa de terra e as paredes D, E e F foram rebocadas com uma argamassa à base de cimento e cal. Os resultados dos ensaios são apresentados na tabela 12.

Tabela 12: Resultados dos ensaios (Ash, *et al.*, 2003)

Parede	Argamassa	Reforço	Força máxima [kN]	Drift da força máxima [%]	Força do Drift de 2,5%
A	Terra/areia/palha	Fio de polipropileno que realiza a ancoragem da viga à fundação da parede, com 0,5m de espaçamento	14,23	4	12,67
B	Terra/areia/palha	Rede <i>Cintoflex</i> , com 48mm de malha de diâmetro de 1,2mm	20,90	1	16,46
C	Terra/areia/palha	Rede electrosoldada, com 5cm de malha de diâmetro de 1,63mm, fixa à parede de 60cm em 60cm	27,13	1,5	24,02
D	Cimento/cal/areia	Rede metálica hexagonal com 1,15mm de diâmetro	28,47	1,5	26,69
E	Cimento/cal/areia	Rede electrosoldada, com 5cm de malha de diâmetro 1,63mm	84,52	2	75,61
F	Cimento/cal/areia	O mesmo reforço da parede E mas, com confinamento dos fardos, na base e no topo da parede, por aplicação de tirantes transversais que ligam a rede de ambas as faces	79,62	2	44,48



## **Capítulo 4**

### **Caracterização da argamassa de revestimento e dos fardos de palha**

## 4 Caracterização da argamassa e dos fardos de palha

A caracterização dos fardos de palha e da argamassa é importante, uma vez que as propriedades de ambos os materiais são responsáveis pelo desempenho de uma parede de fardos de palha portadores “paredes resistentes” como é o caso da Técnica Nebraska Armada. Relativamente a esta técnica construtiva, os fardos devem possuir densidade superior a  $96 \text{ Kg/m}^3$  (Bouter, *et al.*, 2009).

### 4.1.1 Caracterização dos fardos de palha

Os fardos de palha foram caracterizados relativamente à sua densidade, ou massa volúmica. Esta foi determinada com base numa amostra de 10 elementos, retirados de forma aleatória da população dos fardos de palha a empregar na construção das paredes. Analisando-se os resultados apresentados na tabela 12 pode-se dizer que os fardos de palha possuem em média, as dimensões de  $0,90 \times 0,35 \times 0,46 \text{ m}^3$  e uma densidade de  $108,95 \text{ kg/m}^3$ , que corresponde  $1,07 \text{ kN/m}^3$ .

Tabela 13: características da amostra de fardos

















Fardos	Dimensões (m)			Volume ( $\text{m}^3$ )	Peso (kg)
	Comp.	Largura	Altura		
1	0,96	0,35	0,45	0,151	17
2	0,95	0,36	0,47	0,160	19
3	0,91	0,35	0,46	0,146	16
4	0,92	0,34	0,45	0,140	15
5	0,84	0,35	0,46	0,135	15
6	0,85	0,36	0,45	0,137	15
7	0,88	0,36	0,44	0,139	15
8	0,9	0,34	0,46	0,140	14
9	0,94	0,34	0,45	0,143	15
10	0,82	0,36	0,46	0,135	15
Média	0,897	0,351	0,455	0,143	15,6

### 4.1.2 Escolha e caracterização da argamassa de revestimento

As paredes construídas foram rebocadas com a mesma argamassa, no entanto, a execução do reboco altera consoante a técnica construtiva da parede. No processo de

escolha da argamassa estiveram envolvidas 4 composições diferentes A1, A2, A3 e A4 (Tabela 13). As argamassas A2, A3 e A4 foram desenvolvidas com base na argamassa A1, que tem vindo a ser empregue com alguma regularidade na construção de habitações em fardos de palha, nas argamassas tradicionais e nas argamassas de terra estabilizadas com cal hidratada. É importante salientar a adição de serrim, este origina a redução da densidade e aumenta a porosidade da argamassa, proporcionando um acréscimo da capacidade de transferência de vapor de água, entre o corpo da parede e a sua envolvente (Arnaud, *et al.*, 2009).

Tabela 14: Composição das argamassas

Argamassa	Adição de serrim (vol.)	Traço				Massa (gr)
		Cimento (vol.)	Cal aérea (vol.)	Terra (vol.)	Areia (vol.)	
A1						1306
A2						1147
A3						1282
A4						1443

Para se caracterizar a resistência à flexão e à compressão das diferentes argamassas, produziram-se provetes prismáticos com recurso a moldes normalizados de aço, de dimensões  $4 \times 4 \times 16$  cm. Após o desmolde dos provetes, que ocorreu 48 horas após o enchimento dos mesmos, foram sujeitos às mesmas condições de cura (temperatura e humidade) e garantiu-se desta forma, a fiabilidade da comparação dos resultados entre as várias misturas. Produziram-se três provetes para cada mistura totalizando assim doze provetes (figura 18).

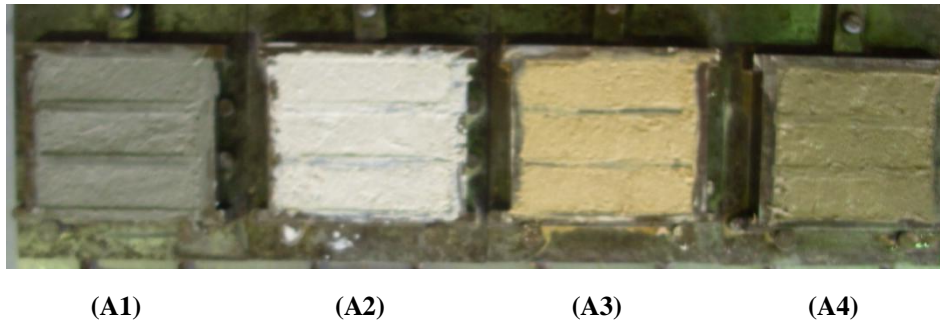


Figura 18: Moldes dos provetes prismáticos das 4 misturas

Ao fim de 14 dias de cura, procedeu-se à realização dos ensaios de resistência em flexão e em compressão como ilustram as figuras 19 e 20. Uma vez que dos ensaios em flexão advêm duas amostras possíveis de ensaiar em compressão, optou-se pela realização dos ensaios em compressão em metade das amostras. As restantes foram ensaiadas aos 28 dias. Estes efectuaram-se de acordo com disposto na norma EN 1015-11:1999.



Figura 19: Ensaio à flexão



Figura 20: Ensaio à compressão

Para uma maior precisão nos resultados, dada a fragilidade das argamassas em questão, optou-se por um anel de 3kN para a realização destes ensaios. Seguindo-se a colocação do provete sendo este centrado relativamente ao ponto de aplicação da força (a meio vão) com o eixo longitudinal perpendicular aos apoios das extremidades. Foi tomada particular atenção para o contacto entre provete de modo a que os apoios aconteçam sempre sobre as faces de moldagem.

O ensaio foi iniciado com o movimento ascendente do cutelo da máquina a uma velocidade constante de 1mm/seg de forma contínua até à ocorrência da rotura do provete. O ensaio de resistência à compressão foi realizado sobre as metades resultantes do ensaio de flexão. No ensaio à compressão, foram usados dois anéis de carga, de 3 kN para as argamassas A1, A2, A3 e de 10 kN para a mistura A4. Na tabela 15, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência em flexão e em compressão das argamassas A1, A2, A3 e A4.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de flexão e de compressão das argamassas

Argamassa	Resistência aos 14 dias, (N/mm <sup>2</sup> )	
	Flexão	Compressão
A1	0,67	1,44
A2	0,10	0,12
A3	0,16	0,29
A4	0,98	2,48

Das quatro argamassas envolvidas no processo de escolha, a mistura A4 mostrou o melhor desempenho. Sendo um dos objectivos deste trabalho, aumentar a capacidade resistente das paredes de fardos portadores a escolha decaiu sobre esta mistura (argamassa A4).

Durante a execução do reboco das 12 paredes construídas no âmbito deste trabalho recolheram-se amostras da argamassa (a1, a2, a3, a4). Neste caso, como existiu a necessidade de realizar alterações na composição da argamassa, nomeadamente na execução do chapisco, este também foi sujeito à recolha de uma amostra (a5) para posterior análise mecânica, à flexão e compressão. No total, efectuaram-se cinco recolhas, quatro de argamassa e uma da argamassa de chapisco. De cada recolha produziram-se 3 provetes prismáticos normalizados, perfazendo um total de 15 provetes para análise. Os ensaios realizaram-se ao fim de 90 dias e os resultados são expostos na tabela que se segue.

Tabela 16: Resultados dos ensaios à flexão e à compressão das amostras recolhidas ao longo da construção das paredes

Argamassa	Resistência aos 90 dias, (N/mm <sup>2</sup> )	
	Flexão	Compressão
a1	0,41	0,55
a2	0,68	1,11
a3	0,91	2,15
a4	0,47	0,93
a5 (Chapisco)	0,88	1,79

Ao analisar-se os resultados dos ensaios à flexão e de compressão presentes na tabela anterior, detecta-se uma grande variação entre os valores, podendo este facto dever-se a uma possível falta de rigor no processo de produção da argamassa. Dito isto, nada se pode concluir relativamente às propriedades mecânicas da argamassa de revestimento. Relativamente à argamassa de chapisco (a5) composta por cimento, cal hidratada, terra e serrim à proporção de 1:1:1:4, pode-se dizer que a resistência à flexão é de 0,88N/mm<sup>2</sup> e a resistência à compressão é de 1,79N/mm<sup>2</sup>.

## **Capítulo 5**

### **Sistemas e instrumentação da campanha experimental**

## 5 Sistema e instrumentação da campanha experimental

Este capítulo dedica-se à apresentação dos sistemas e da instrumentação dos ensaios realizados ao longo da campanha experimental do presente trabalho. Os ensaios executaram-se no laboratório do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade de Aveiro. Foram testado 12 paredes, três de cada técnica em estudo, das quais, duas foram sujeitas ao ensaio de compressão e a restante foi submetida ao ensaio cíclico horizontal no plano. Na tabela 17, é possível ver a lista das técnicas e a nomenclatura usada na identificação das paredes testadas.

Tabela 17: Nomenclatura usada para identificar das paredes de cada técnica

Técnica	Ensaio de compressão	Ensaio cíclico horizontal no plano
Nebraska Armada	NA-1; NA-2	NA-3
C.S.T	CST-1; CST-2	CST-3
G.R.E.B	GREB-1; GREB-2	GREB-3
Abarrotar	Ab-1; Ab-2	Ab-3

Importa referir que todas as alterações nos sistemas de ensaio ou na instrumentação dos mesmos aqui expostos serão referenciadas e apresentadas no capítulo correspondente às técnicas construtivas das paredes onde ocorreram as alterações.

### 5.1 Sistema e instrumentação do ensaio de compressão

O sistema de ensaio de compressão (figura 21) foi composto por um pórtico metálico fixo à laje de reacção do laboratório por pré-esforço e por uma viga de distribuição de carga por toda a área da parede. A carga foi aplicada por um actuador hidráulico de 500kN com 250mm de desenvolvimento, medida por uma célula de carga colocada entre o actuador e a viga de distribuição que a transferia para o topo da parede.



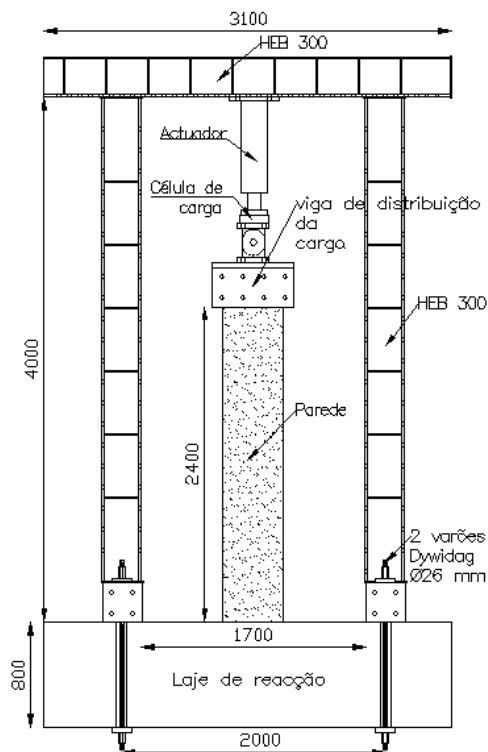
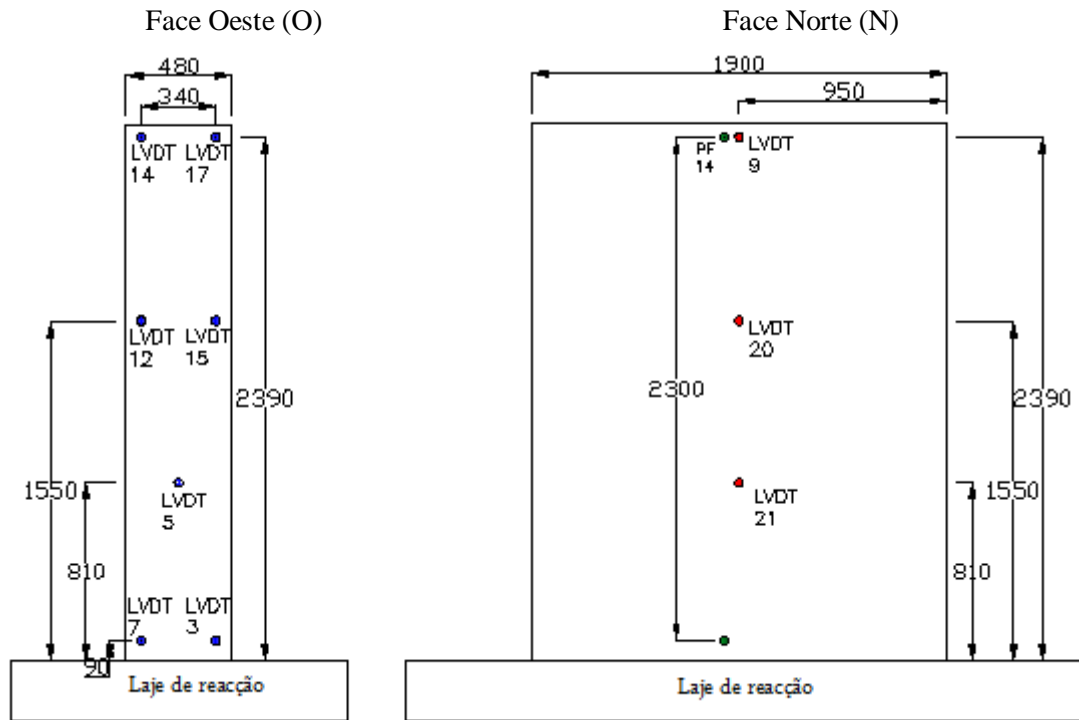


Figura 21: Representação esquemática e imagem do ensaio de compressão

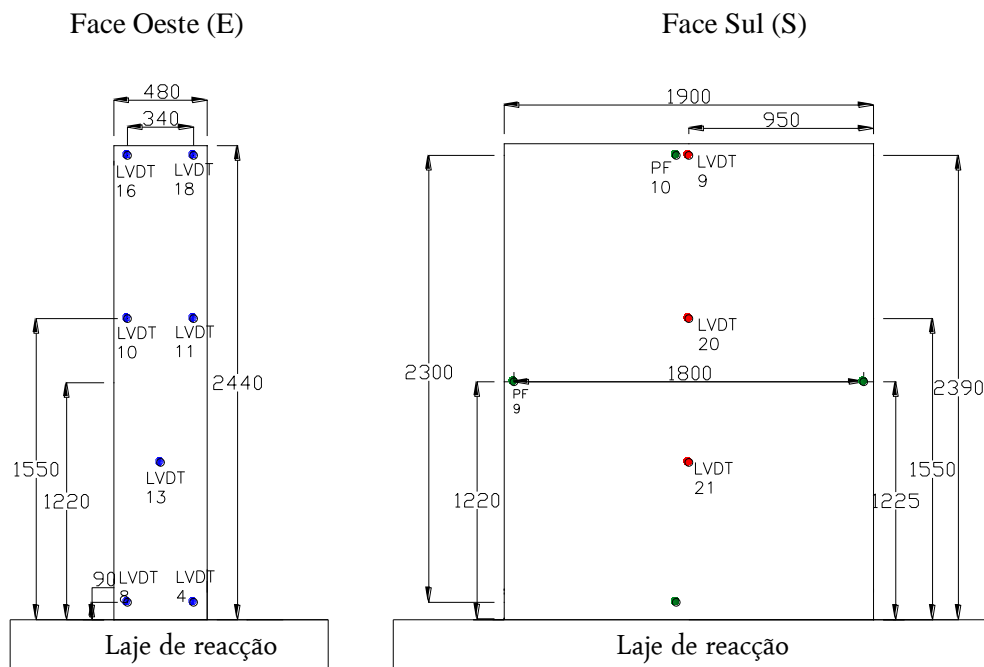
Os deslocamentos, verticais e horizontais sofridos pelas paredes ao longo do ensaio, foram medidos por transdutores (LVDT's) e por potenciômetros de fios. Cobriram todas as faces das paredes e foram fixos a um andaime simples, com rigidez suficiente, de modo a evitar movimentos indesejados, por parte dos transdutores no decorrer do ensaio. Nas figuras 30 e 31, é possível ver o posicionamento dos transdutores e dos potenciômetros aplicados em cada uma das faces, Norte (N), Sul (sul), Este (E) e Oeste (O).



● Transdutores de deslocamento horizontal; ● Transdutores de deslocamento vertical

● Potenciómetro deslocamento de fio

Figura 22: Planta da instrumentação [mm]



● Transdutores de deslocamento vertical; ● Transdutores de deslocamento horizontal

● Potenciómetro deslocamento de fio

Figura 23: Planta da instrumentação [mm]

## 5.2 Sistema e instrumentação do ensaio cíclico horizontal no plano

Este tipo de ensaio é caracterizado pelas sequências cíclicas de deslocamento em amplitude crescente progressiva. Neste caso, cada sequência, segmento ou nível de deslocamento é composto por 3 ciclos. A lei de deslocamentos imposta nos ensaios vigora na figura 24.

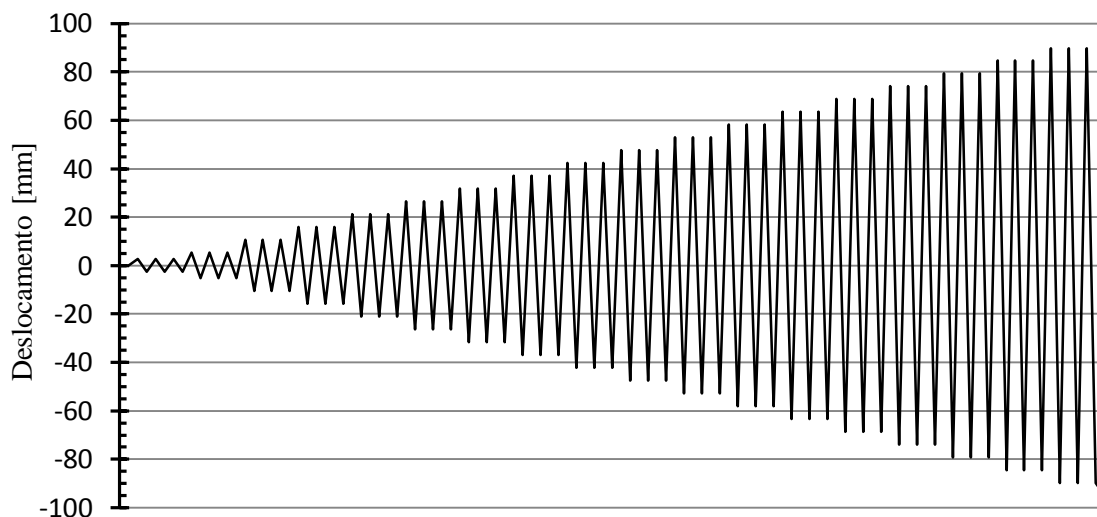


Figura 24: Lei de deslocamento

O sistema do ensaio cíclico de carga horizontal no plano foi formado por vários elementos e estrutura de apoio. Estrutura de fixação da parede executada na sua base, de modo a evitar qualquer movimento horizontal, vertical e de rotação no decorrer do ensaio, para tal a estrutura teve de reagir às forças horizontais e de momento. No topo da parede, no alinhamento do eixo de aplicação da força horizontal aplicaram-se elementos metálicos para transferirem a carga por atrito, ao longo de todo o comprimento da parede. Vários elementos metálicos constituíram a massa de sobrecarga que foi de 24kN. A força horizontal foi aplicada a 2,115m (figura 25) relativamente ao eixo de encastramento da base da parede, com recurso a um actuador hidráulico de 300kN com 250mm de deslocamento máximo. A força foi controlada por deslocamento e a sua intensidade medida através de uma célula de carga colocada na extremidade do braço do actuador.

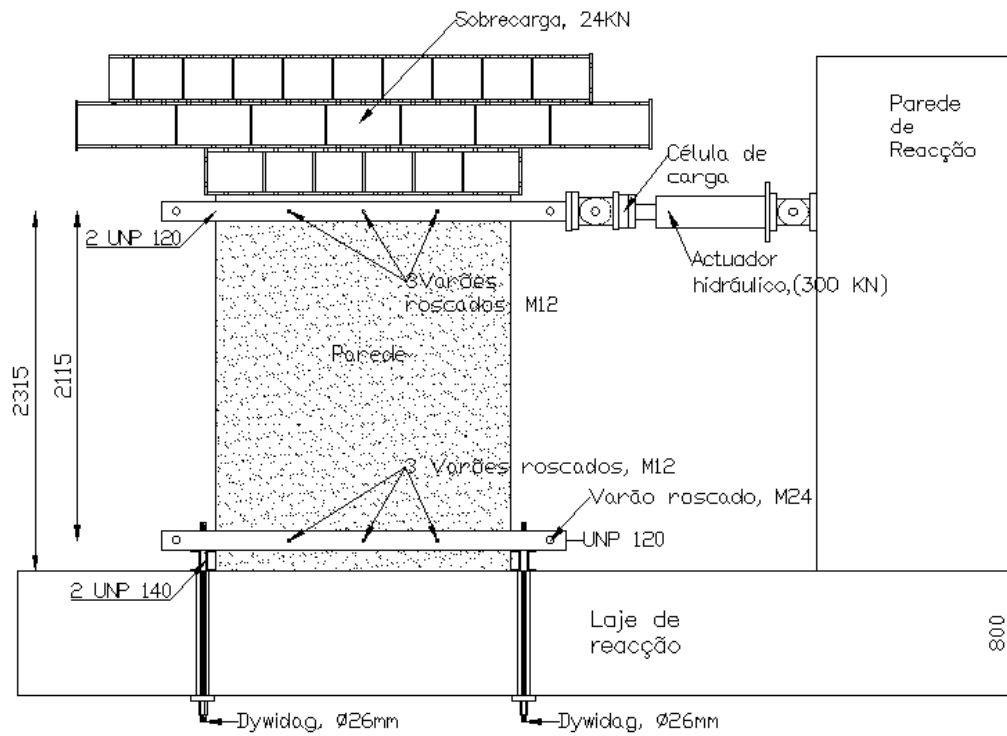


Figura 25: Sistema do ensaio cíclico de carga horizontal no plano



Figura 26: Imagem do ensaio cíclico horizontal no plano

Os valores dos deslocamentos verticais, horizontais foram registados através de transdutores de deslocamento (LVDT's), aplicados nas faces Este (E), Oeste (W), respectivamente. Os transdutores de deslocamento verticais e horizontais foram fixos à estrutura, andaime simples de rigidez satisfatória, garantindo desta forma a inexistência de movimentos indesejados por partes dos transdutores no decorrer do ensaio, os outros fixaram-se na própria parede. Através da figura 27 podem-se observar as plantas correspondentes à posição dos transdutores das faces Este (E) e Oeste (O).

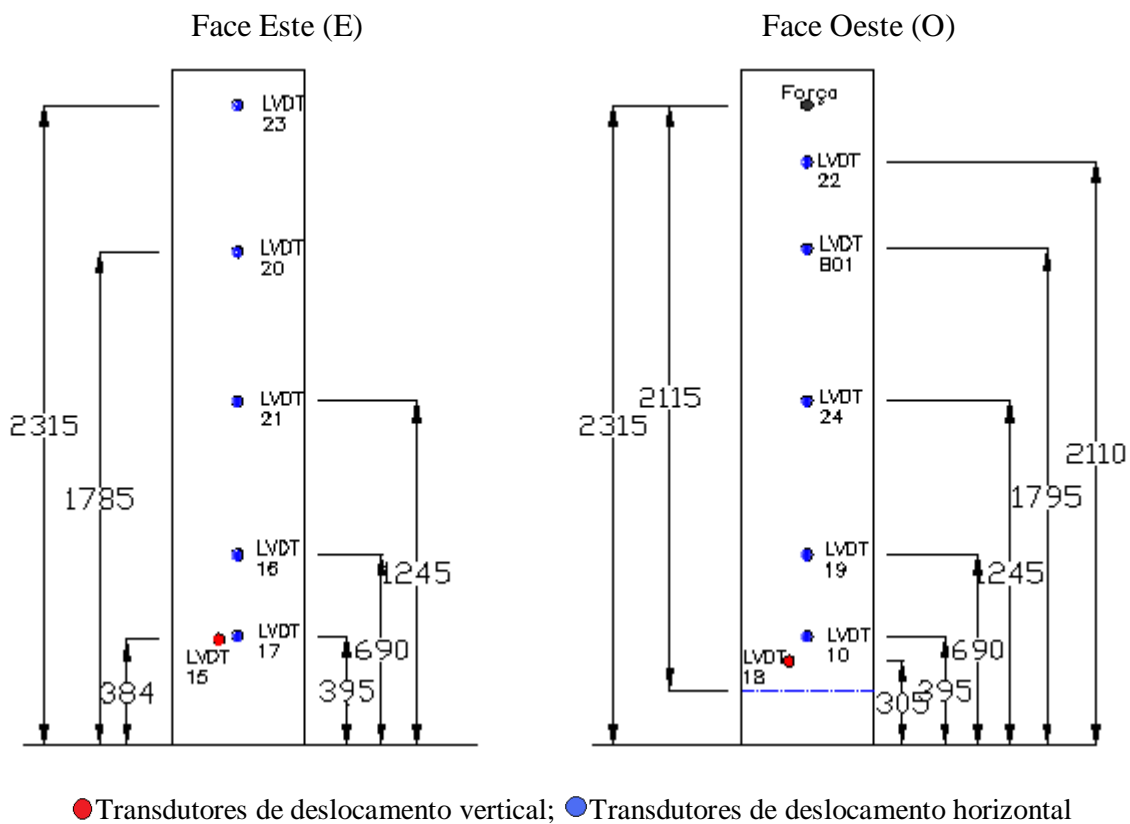


Figura 27: Planta da instrumentação [mm]

## **Capítulo 6**

### **Técnica Nebraska Armada – Caracterização mecânica de paredes**

## 6 Técnica Nebraska Armada – caracterização mecânica de paredes

Este capítulo é dedicado ao estudo da Técnica Nebraska Armada. Onde se descreve a técnica, o processo construtivo e o custo de construção. Apresenta o comportamento mecânico ao longo dos ensaios e apresenta os resultados dos mesmos.

### 6.1 Descrição da técnica

A Técnica Nebraska Armada (figura 28) tem por base a Técnica de Nebraska, que sofreu algumas alterações com o objectivo de aumentar a capacidade resistente das paredes. As alterações consistem na execução de uma armadura que é aplicada em ambas as faces da parede, interior e exterior, ligadas entre si por tirantes. Deste modo, os fardos de palha ficam confinados à armadura que é concebida em varões de aço A400, com 8 mm de diâmetro com espaçamento de 0,45m. Posteriormente, é amarrada uma rede metálica hexagonal com 12,5 mm de malha à armadura. As 3 paredes, construídas com base nesta técnica, têm 1,88m de comprimento, 2,40m de altura e 0,44m de largura.

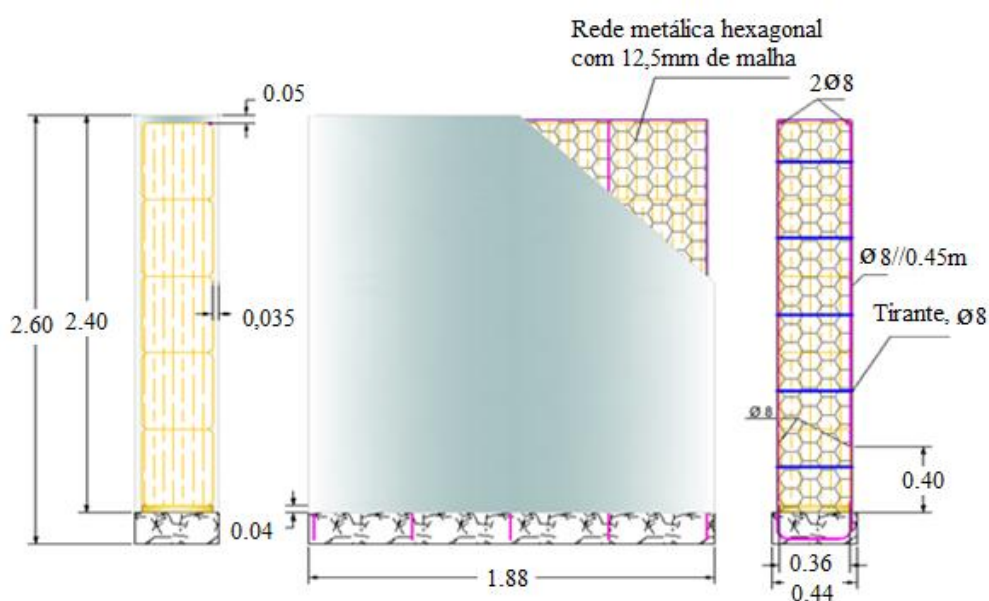


Figura 28: Ilustração da Técnica Nebraska Armada

## 6.2 Processo construtivo da técnica

Inicialmente, executou-se a base em betão com 1,88m de comprimento, 0,44m de largura com 0,15m de altura. Antes da betonagem da base, colocou-se o ferro de arranque com 40cm de comprimento, em aço A400 de 8mm de diâmetro e foi espaçado de forma equidistante ao longo do comprimento da base respeitando um recobrimento de 30mm.

Ao fim de doze dias de cura da base, foram aparafusados dois elementos de madeira de Pinho Bravo com 40mm de espessura encostados ao ferro de arranque. O espaço que ficou sem madeira foi preenchido com brita lavada, como se pode observar na figura 29.

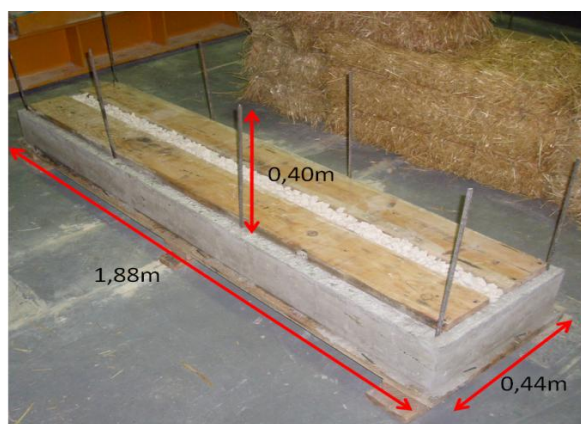


Figura 29: Base da parede da técnica Nebraska Armada

Seguiu-se o assentamento dos fardos de palha, estes forem assentes de “*edge*” e de forma desencontrada sobre o elemento de Pinho Bravo, que se encontra aparafusado à base de betão. Aquando da finalização do assentamento dos fardos, com um total de cinco fiadas em cada parede, detectaram-se algumas zonas vazias, nomeadamente nas juntas verticais entre os fardos que podem resultar das irregularidades físicas dos mesmos. Na figura 30, encontram-se representadas algumas das regiões das paredes com enchimento insuficiente.





Figura 30: Representação das regiões vazias de palha entre os fardos

De forma a reduzir as irregularidades das juntas entre os fardos, realizou-se a cintagem longitudinal em cada fiada de fardos atando-a e comprimindo-os com fios de poliéster, do mesmo tipo dos usados na produção dos fardos. A figura 31 mostra que a cintagem minimizou o problema das falhas do enchimento. Após o ajustamento dos vazios seguiu-se a execução da armadura (figura 31), pela seguinte ordem:

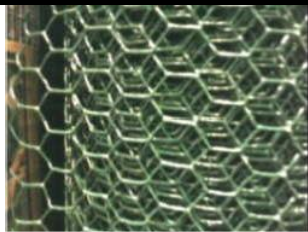
- Aplicação dos varões de aço com 8Ø,
- Execução dos tirantes,
- Amarração da rede metálica de malha 12,5mm aos varões com recurso de arame, na base a rede foi fixa através de pregos ao elemento de madeira.



Figura 31: Parede com armadura

A rede de malha hexagonal vai permitir uma melhor distribuição dos esforços por toda a área da parede. As especificações da rede usada são expostas na tabela que se segue.

Tabela 18: Características da rede metálica

Rede metálica	Especificações	Ilustração
Bet. Casanet Galv Malha	M=12.5×12.5mm Ø=0.65mm	

A última etapa da construção da parede consistiu na realização do reboco, que foi executado com um a argamassa A4, com uma espessura de 35mm. Na regularização do topo superior foi aplicada uma camada superior de argamassa totalizando 50mm de espessura.

O reboco foi realizado por camadas, primeiramente executou-se o chapisco seguido de duas camadas de regularização. Durante a execução do chapisco e das camadas de regularização, até ao preenchimento do espaço existente entre a superfície dos fardos e a rede, a argamassa chapada não atravessava a malha da rede devido à presença de fibras de madeira no serrim. Para ultrapassar essa dificuldade, o serrim utilizado na concepção da argamassa, para este tipo de parede foi crivado para extrair as fibras até superar a barreira da rede. As figuras 32, 33 e 34 ilustram os trabalhos e o aspecto da execução do reboco, chapisco, camadas de regularização e parede rebocada, respectivamente.



Figura 32: Realização do chapisco



Figura 33: Realização das camadas de regularização



Figura 34: Parede rebocada

### 6.3 Contabilização dos custos

Na contabilização dos custos consideraram-se os preços unitários praticados durante a construção das paredes (de Março a Setembro de 2010). Relativamente aos rendimentos da mão de obra das várias etapas da construção das paredes foram determinados com base no tempo despendido na execução das mesmas.

Na tabela 19 encontram-se os preços dos materiais utilizados, a quantidade e o custo do material por metro quadrado de parede que é de 7,69€/m<sup>2</sup>. Na tabela 20 anuncia-se o custo dos operários, o número de elementos por equipa de trabalho, o rendimento e o preço da mão de obra por metro quadrado de parede, que é de 12,42€/m<sup>2</sup>.

Tabela 19: Contabilização do custo do material por m<sup>2</sup>

Material			
Designação	Custo	Quantidade	€/m <sup>2</sup>
Madeira de pinho com 2,5 de espessura	520,00€/m <sup>3</sup>	0,05 m <sup>3</sup>	1,87
Fardos de palha	2,50 €/un	30 un	5,54
Varões de aço A400 com Ø8mm	0,82 €/kg	32 un	1,94
Rede metálica galvanizada de malha hexagonal (12,5×12,5mm)	1,00 €/m <sup>2</sup>	36,9 m <sup>2</sup>	2,20
Argamassa	45,00 €/m <sup>3</sup>	1,174 m <sup>3</sup>	3,90
Total			15,45

Tabela 20: Contabilização do custo da mão-de-obra por m<sup>2</sup>

Mão de obra						
Tarefa	un	Equipa de trabalho			Rendimento h/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>
		nº	Operário	€/h		
Assentamento dos fardos de palha e enchimento dos vazios com palha	h	1	Pedreiro	8,20 €	0,16	1,31
Corte e execução da armadura em aço A400 Ø8mm	h	1	Pedreiro	5,90 €	0,18	1,06
Corte e aplicação da rede metálica galvanizada	h	1	Pedreiro	8,20 €	0,14	1,97
		1	Servente	5,90 €		
Produção da argamassa e realização do reboco das paredes	h	1	Servente	5,90 €	0,362	8,07
		2	Pedreiro	8,20 €		
					Total	12,42

Em suma pode-se dizer que a custo por metro quadro de uma parede erguida segundo a técnica Nebraska Armada é de 27,88€, deste valor, 55% é da responsabilidade dos materiais e os restantes 45% estão associados à mão de obra, como se pode ver na figura 28.

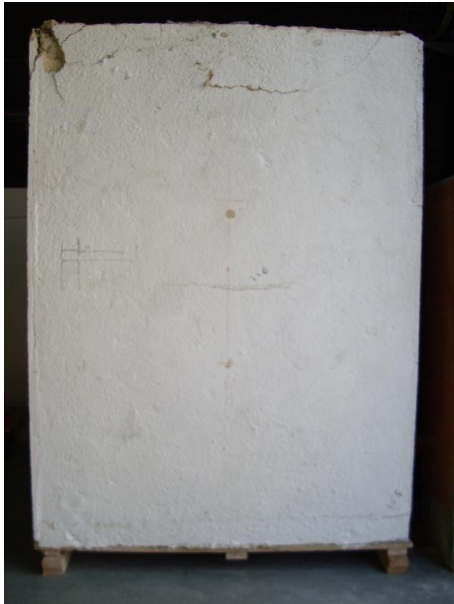
## 6.4 Descrição dos ensaios mecânicos

Nesta secção, descreve-se o comportamento mecânico das paredes ao longo dos ensaios de compressão e do ensaio cíclico horizontal no plano.

### 6.4.1 Descrição do ensaio de compressão

O comportamento mecânico das duas paredes de Nebraska Armada à compressão foi muito semelhante. As fissuras surgiram muito próximas da carga de rotura, as mais significativas detectaram-se na parte superior a parede, com maior expressão numa das faces da mesma, Norte ou Sul. Na base, as fissuras apareceram nas faces Norte e Sul na ligação das paredes à base de betão. Relativamente à rotura, pode-se dizer que foi frágil, uma vez que não existiu qualquer modificação significativa nas paredes até ao acontecimento da mesma. Nas figuras 35 e 36 é possível ver-se por parede e por face, o

dano sofrido durante ensaio de compressão, e identificar zonas de destacamento da argamassa de recobrimento da armadura.



Face Norte



Face Sul

Figura 35: Fissuras na parede NA-1



Face Norte



Face Sul

Figura 36: Fissuras na parede NA-2



#### 6.4.2 Descrição do ensaio cíclico horizontal no plano

Iniciou-se o ensaio e à medida que este progredia, o deslocamento imposto à parede aumentava verificando-se o aparecimento de fissuras. As primeiras, visíveis a olho nu surgiram para um deslocamento, ao nível de aplicação da força de 10,5mm e possuíam uma espessura entre 0,5 a 1mm, ver foto da esquerda da figura 36. Prosseguiu-se com o ensaio e, no ciclo seguinte com 15,8mm de deslocamento apareceram novas fissuras, muito próximas da existente que progrediu em espessura e em desenvolvimento, ver foto da direita da figura 37.



Figura 37: Primeiras fissuras na parede NA-3

As fissuras representadas anteriormente dizem respeito à base da face Oeste (O), na face Este (E) ocorreu o mesmo tipo de fissuras mas em deslocamentos superiores. Os danos aumentaram progressivamente até que no deslocamento imposto de 31,7mm aconteceu o destacamento do reboco na base da face oeste (E) (figura 38) enquanto na face Este (E) ao mesmo nível, a fissura propagou-se por toda a largura da parede, com espessura apreciável e desenvolveu-se ao longo do comprimento da parede (figura 39).

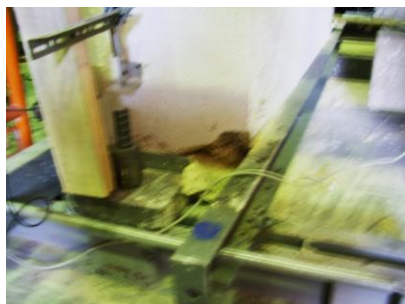


Figura 38: Fissura da base Oeste (O) da parede NA-3

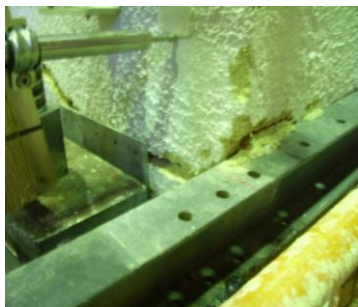


Figura 39: Fissura da base Este (E) da parede NA-3

Ao fim do penúltimo ciclo de deslocamento com 47,5mm, as fissuras já possuíam dimensões consideráveis de 2 a 3 cm de espessura (figura 40). A interrupção do ensaio deveu-se à instabilidade lateral e à rotação da parede que evidenciava o colapso da mesma para fora do plano a qualquer instante.

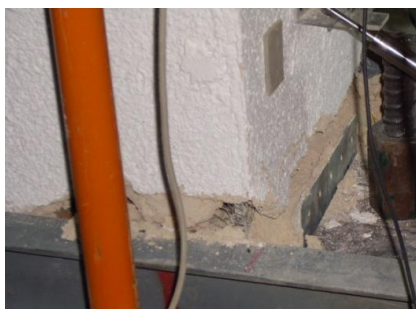


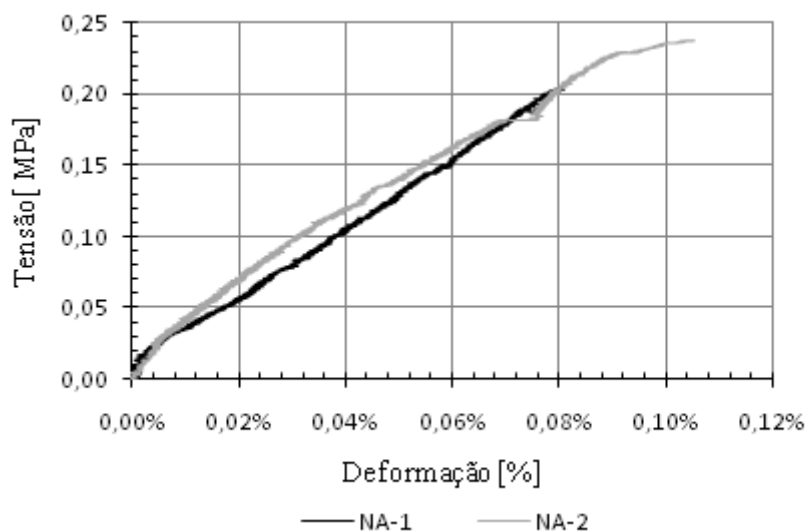
Figura 40: Dano na da base da parede NA-3

## 6.5 Resultados e conclusões gerais

Neste ponto, são apresentados os resultados da campanha experimental que resultam da análise dos registos dos transdutores de deslocamento e dos potenciômetros.

### 6.5.1 Resultados do ensaio de compressão

O diagrama de tensão *versus* deformação (figura 41) é referente aos ensaios de compressão realizados a duas paredes da técnica em estudo neste capítulo, designadas por NA-1 e NA-2.

Figura 41: Gráfico de tensão *versus* deformação

Na tabela 21, indicam-se os resultados obtidos, para cada parede, nos ensaios de compressão e a respectiva média. Os valores apresentados são referentes à força máximas ( $F_{V,máx.}$ ), deslocamento máximo ( $\delta_{V,máx.}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{V,máx.}$ ) e deformação máxima ( $\epsilon_{V,máx.}$ ).

Tabela 21: Resultados dos ensaios de compressão

Parede	$F_{V, máx.}$ [kN]	$\delta_{V, máx.}$ [mm]	$\sigma_{V, máx.}$ [MPa]	$\epsilon_{V, máx.}$ [%]
NA1	180,47	2,58	0,20	0,08
NA2	211,43	5,25	0,24	0,10
Média	195,95	3,91	0,22	0,09

Com base nos resultados obtidos do ensaio de compressão podem-se retirar as seguintes conclusões gerais:

- Ambas as paredes apresentaram um comportamento mecânico semelhante, que foi linear até suceder a rotura, assim sendo, a rotura das paredes da técnica Nebraska Armada por compressão é frágil.
- A capacidade resistente das paredes evidenciou uma variação de 17,15%. Esta variação, pode estar relacionada com a espessura do revestimento das paredes,



uma vez que o revestimento em argamassa é responsável pela resistência à compressão porque a palha é muito compressível quando sujeita à compressão;

- A capacidade média resistente de carga, para este tipo de parede por metro linear é de 104kN, o que corresponde a uma tensão aparente de 0,22Mpa.

### 6.5.2 Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano

Os resultados aqui apresentados resultaram da análise do registo de apenas um transdutor de deslocamento, transdutor (LVDT 23). Que se encontra aplicado na face Deste, obtiveram-se as curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento da parede apresentadas na figura 42.

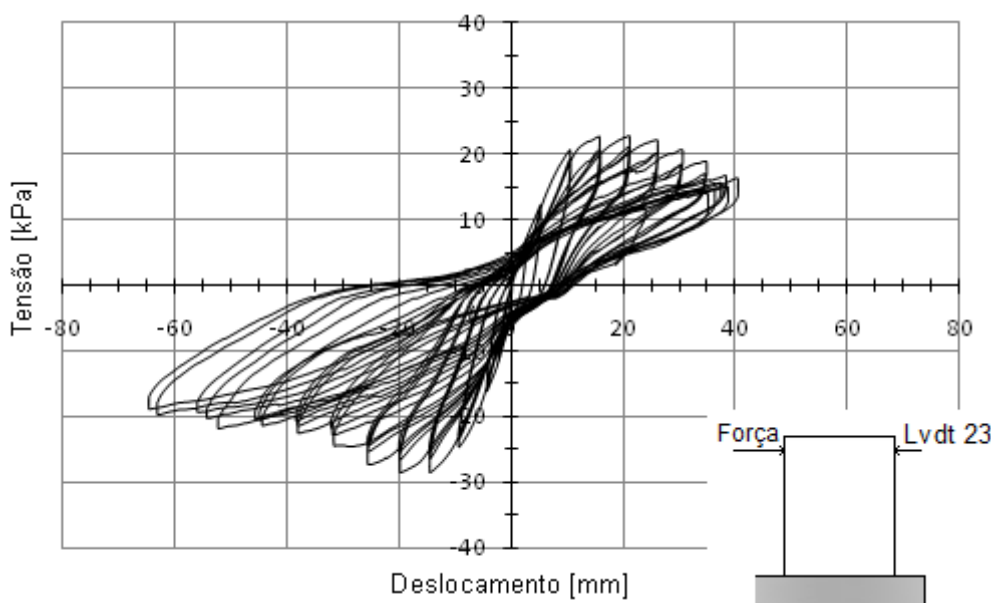


Figura 42: Curvas histeréticas tensão *versus* deslocamento

Com base nos resultados obtidos da evolução da força com deslocamento imposto podem-se retirar, do ensaio cíclico, as seguintes conclusões gerais:

- Os danos localizaram-se na interface entre a base de betão e a primeira fiada de fardos, nas zonas de compressão e tracção de acordo com o sentido da solicitação. Este facto pode dever-se ao encamisamento da parede, que concedeu à mesma a capacidade de dissipar a energia;

- A força máxima aplicada na parede foi de 23,6kN, à qual corresponde a tensão aparente máxima de 28kPa, para 21,4mm de deslocamento impostos que equivale ao *drift* de 1,2%;
- Também se pode dizer, que o deslocamento máximo sofrido pela parede foi de 40mm correspondentes a 1,91% de *drift*, uma vez que para deslocamentos superiores o comportamento apresentado pela parede NA-3 é assimétrico e apresentava sinais de instabilidade;
- Através da análise dos danos, após a interrupção do ensaio por instabilidade instalada na parede é possível dizer que a mesma tem origem no rompimento da ligação da parede à base “fundação” o que, consequentemente provoca movimento para fora do plano, ao nível do topo da parede. Esta deixa de estar em prumo fazendo com que a sobrecarga passe a ser excêntrica, aumentando sucessivamente até ocorrer o colapso.

## **Capítulo 7**

### **Técnica C.S.T – caracterização mecânica de paredes**

## 7 Técnica C.S.T – caracterização mecânica de paredes

Neste capítulo é apresentado o estudo da Técnica C.S.T (Célula Sob Tensão). Onde se explica a técnica, o processo construtivo e o seu custo por metro quadrado. Apresentam-se também, as alterações à instrumentação dos ensaios de compressão realizados e os seus resultados.

### 7.1 Descrição da técnica

Esta técnica consiste na construção de células sob tensão onde a palha desempenha funções de contraventamento, além da térmica e acústica. A célula é constituída por um fardo de palha que sofre um suplemento de tensão entre os elementos de madeira, longitudinais e verticais. Os elementos verticais servem de suporte de carga e de fixação dos elementos longitudinais a fim de conferir tensões em todas as direcções do fardo. O afastamento entre os diversos elementos verticais está relacionado com as dimensões do fardo a utilizar, que é 5cm inferior ao comprimento do fardo, garantindo desta forma o suplemento de tensão pretendido. Relativamente à largura dos elementos verticais, esta deve ser inferior à espessura do fardo de modo a que madeira fique recuada evitando assim as pontes térmicas e possíveis fissuras que possam surgir no reboco nas zonas em contacto com a madeira assim como todas as patologias que possam advir das fissuras. Neste caso, as secções dos elementos de madeira são de  $20 \times 4\text{cm}^2$  para os elementos verticais,  $20 \times 4\text{cm}^2$  para os elementos horizontais da base e do topo da parede. Para os elementos horizontais que realizam a ligação entre os elementos verticais ao fim de cada fiada de fardos, a secção é de  $3,5 \times 2,5\text{cm}^2$ . A figura 43 apresenta a ilustração do esquema construtivo da técnica em questão.

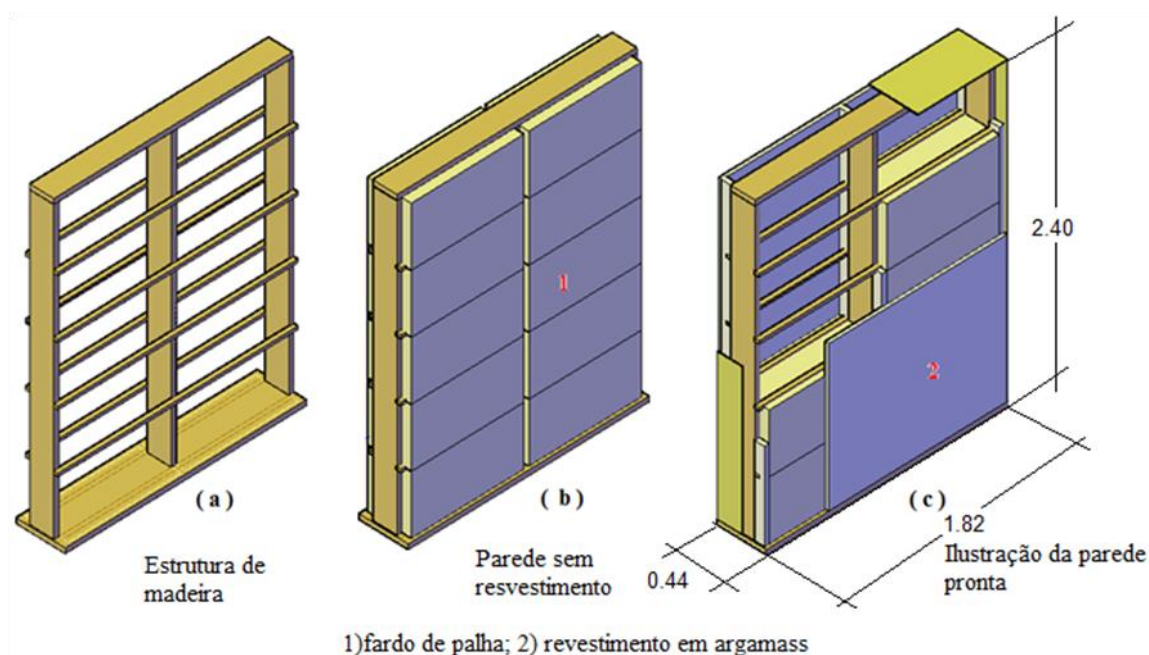


Figura 43: Ilustração da técnica C.S.T (Célula Sob Tensão)

As ligações entre os diversos corpos de madeira de Pinho Bravo são do tipo cavilha, aparafusadas. No entanto, a ligações entre elementos estruturais verticais com a base, também de madeira é reforçada por cantoneira e chapas em aço galvanizado, com 2mm de espessura.

## 7.2 Processo construtivo da técnica

Começou-se por conceber as bases das respectivas paredes, neste caso de madeira, com as seguintes dimensões, 1,82m de comprimento, 0,44m de largura por 2,40m de altura. Sobre a mesma montou-se a estrutura em madeira de Pinho Bravo, os montantes são ligados à base através de ligações reforçadas com chapas de  $200 \times 100 \text{ mm}^2$  e cantoneiras  $L80 \times 80 \times 3 \text{ mm}$  com 200mm de comprimento. Como se pode verificar nas figuras 44, 45, 46 e 47.

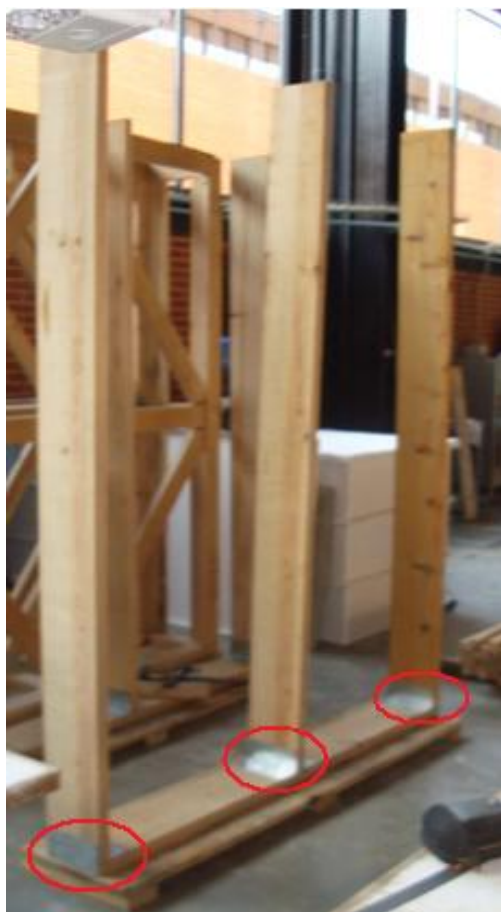


Figura 44: Estrutura principal



Figura 45: Ligação lateral pelo exterior



Figura 46: Ligação do montante central



Figura 47: Ligação lateral interior

Prosseguiu-se a construção das paredes com a colocação dos fardos. No fim de cada fiada, os fardos são comprimidos na zona que vai alojar o elemento longitudinal de madeira. Este é pregado, com pregos ( $\varnothing 3,5 \times 60 \text{ mm}$ ) aos elementos verticais da estrutura em ambas as faces, interior e exterior da parede. Os elementos verticais de madeira, tal como os outros elementos que efectuem a ligação entre os verticais, no topo e na base são de secção  $20 \times 4 \text{ cm}^2$ . Os elementos horizontais, de contraventamento aplicados longitudinalmente ao fim de cada fiada de fardos possuem secção de  $2,5 \times 3,5 \text{ cm}^2$ . A colocação da peça de topo das paredes ocorre após a conclusão da última fiada de fardos com recurso a ligações do tipo cavilha, com 3 ligadores com  $\varnothing 6 \times 70 \text{ mm}$ . As figuras 47, 48 e 49 realçam a compressão localizada, a aplicação dos elementos de contraventamento e o aspecto final da parede, respectivamente.



Figura 48: Compressão localizada



Figura 49: Aplicação dos elementos longitudinais



Figura 50: Parede em “bruto”

O reboco das paredes com 35mm de espessura realizou-se por camadas, chapisco e duas de regularização com a argamassa, A4. Na realização do mesmo, nomeadamente na execução do chapisco, defrontou-se o problema de adesão da argamassa à parede. A argamassa chapada era devolvida pela parede projectando-a para o pavimento do laboratório. Ao analisar-se o ocorrido, detectou-se que o agregado projectado para o chão era a areia, detectou-se também, que a argamassa chapada na diagonal em relação à parede penetrava nas fibras da palha e o material projectado para o chão era menor, mas mesmo assim de quantidade considerável. Para driblar as dificuldades, alterou-se a composição da argamassa, apenas para a realização do chapisco, que passou a ser composta cimento, cal aérea, terra e serrim como traço de 1:1:1:4, ou seja, retirou-se a areia por esta ser arremessada para o chão pela parede. Com a nova argamassa de chapisco, este decorreu com normalidade, boa adesão à palha, no entanto, é aconselhado que o mesmo seja chapado na diagonal relativamente às fibras da palha, que se encontram na vertical permitindo assim uma penetração mais efectiva na palha o que beneficia a adesão da argamassa. As figuras 51, 52 e 53 ilustram as fases da execução do reboco.





Figura 51: Realização do chapisco



Figura 52: Realização das camadas de regularização



Figura 53: Parede reboca

### 7.3 Contabilização dos custos

Na contabilização dos custos consideraram-se os preços unitários praticados de Março a Setembro de 2010, período de aquisição dos materiais e execução das paredes. Os rendimentos da mão de obra foram determinados com base no tempo despendido pelas equipa de trabalho na construção das paredes.

Na tabela 22, encontram-se os preços dos materiais utilizados, as quantidades e o custo do material por metro quadrado de parede que é de 30,04€/m<sup>2</sup>. Os custos dos operários, o numero de elementos por equipa de trabalho e os rendimentos encontram-se na tabela 23, de onde se destaca o preço da mão de obra por metro quadrado que é de 20,23€/m<sup>2</sup>.

Tabela 22: Contabilização do custo do material por m<sup>2</sup>

Material			
Designação	Custo	Quantidade	€/m <sup>2</sup>
Elementos de madeira de Pinho de secção (10×4cm <sup>2</sup> )	520,00 €/m <sup>3</sup>	0,38 m <sup>3</sup>	14,60
Fardos de palha	2,50 €/un	30 un	5,54
Parafusos, 35mm	0,03 €/un	150 un	0,31
Ligadores, parafusos (Ø6×70mm)	0,04 €/un	60 un	0,16
Chapas de ligação em aço galvanizado	60,00 €	18 un	4,43
Argamassa	44,00 €/m <sup>3</sup>	1,54 m <sup>3</sup>	5,00
Total			30,04



Tabela 23: Contabilização do custo da mão-de-obra por m<sup>2</sup>

Mão de Obra						
Tarefa	un	Equipa de trabalho			Rendimento h/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>
		nº	Operário	€/h		
Execução da estrutura tridimensional com elementos de madeira de Pinho de secção 10x4cm <sup>2</sup>	h	1	1º Oficial de carpinteiro	13,7	0,44	6,03
Assentamento dos fardos, aplicação de cofragem, produção da argamassa, realização do enchimento dos 4cm e descofragem	h	1	Servente	5,9	1,5	8,85
Produção da argamassa e realização do reboco das paredes	h	1	Servente	5,9	0,24	5,35
		2	Pedreiro	8,2		
					Total	20,23

Analisando o custo de construção por metro quadro de uma parede edificada de acordo com a técnica C.S.T (Célula sob Tensão) que é de 50,27€, em que 60% do valor é da responsabilidade dos materiais e os restantes 40% estão relacionados com a mão-de-obra.

#### 7.4 Sistema e instrumentação dos ensaios mecânicos

Neste tipo de parede, o sistema e instrumentação dos ensaios apresentado no capítulo da especialidade, nomeadamente no capítulo 5 mas, a instrumentação do ensaio de compressão sofreu alterações nas faces Este (E) e Oeste (O). Estas alterações devem-se à estrutura de madeira que se encontra embebida no corpo da parede, equidistante relativamente às faces, exterior e interior da mesma. Uma vez, que os elementos verticais de madeira são de secção 20x4cm<sup>2</sup> era importante perceber se sofriam encurvadura, para além da deformação vertical. Para tal, aplicaram-se transdutores de deslocamento (LVDT's), para registarem os deslocamentos verticais e horizontais das faces Este e Oeste. As plantas da nova instrumentação, das faces em causa encontram-se na figura seguinte.

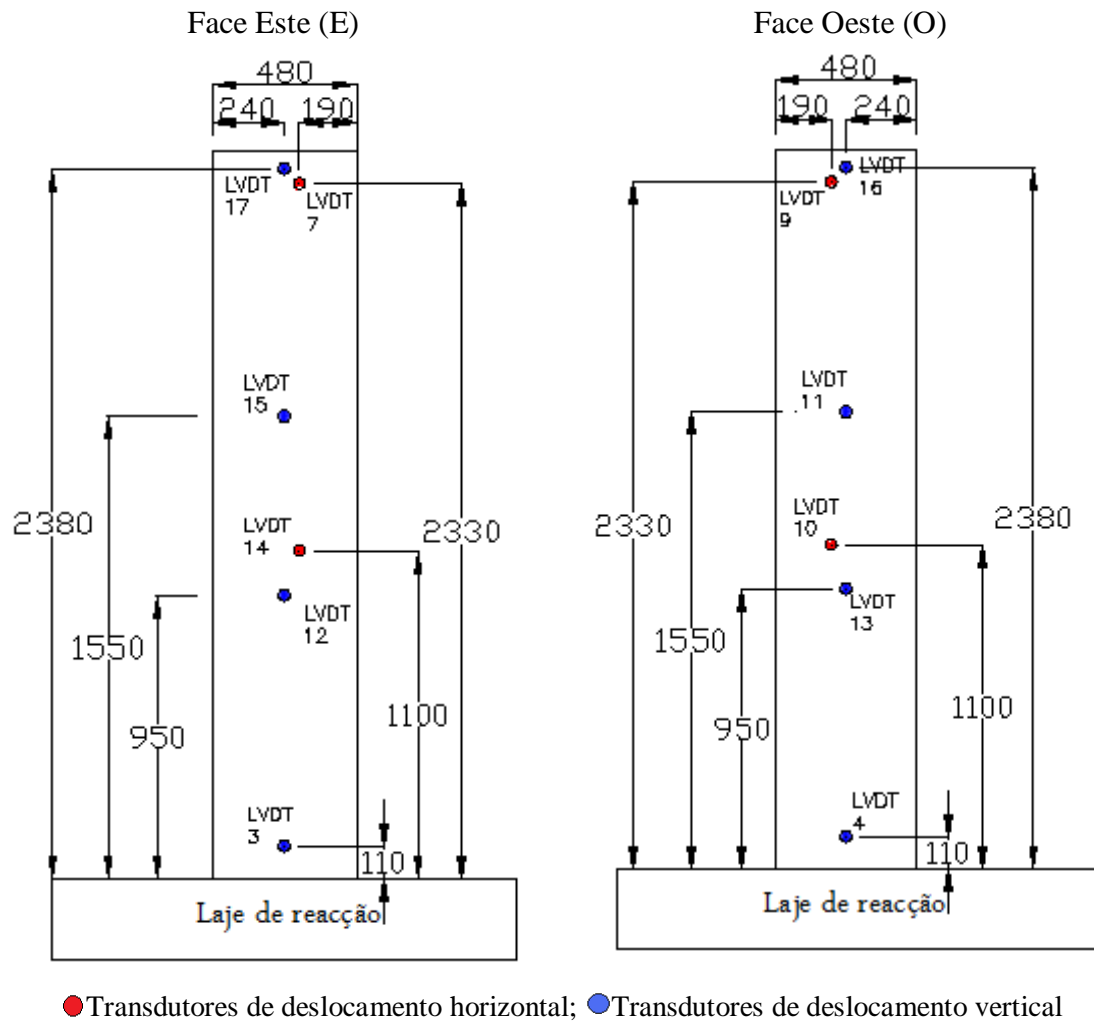


Figura 54: Planta da instrumentação [mm]

## 7.5 Descrição dos ensaios mecânicos

Descreve-se o comportamento mecânico apresentado pelas paredes no desenrolar dos ensaios de compressão e do ensaio cíclico de carga horizontal no plano.

### 7.5.1 Descrição dos ensaios de compressão

Após a conclusão da montagem do sistema de ensaio e da instrumentação deu-se início ao ensaio de compressão. Este foi interrompido, sempre que se justificava para se proceder à marcação de fissuras, nestes casos as paragens ocorreram após os carregamentos de 100, 200kN e aquando da ocorrência da rotura.

As fissuras surgiram muito próximas da carga de rotura, as mais significativas detectaram-se na parte superior a parede, com maior expressão numa das faces da mesma, Norte ou Sul. Na base, as fissuras apareceram nas faces Norte e Sul na ligação das paredes à base de betão. Relativamente à rotura, pode-se dizer que foi frágil, uma vez que não existiu qualquer modificação significativa nas paredes até ao acontecimento da mesma. O dano final nas paredes CST-1 e CST-2 figuram nas figuras 55 e 56, respectivamente.



Face Norte



Face Sul

Figura 55: Dano na parede CST-1



Face Norte



Face Sul

Figura 56: Dano na parede CST-2

### 7.5.2 Descrição do ensaio cíclico horizontal no plano

Iniciou-se o ensaio, este foi contínuo, sem paragens até que as primeiras fissuras fossem perceptíveis, o que se constatou para o deslocamento imposto de 0,25% em relação à distância do eixo de fixação da base da parede até ao ponto de aplicação da carga, que é de 2115mm, correspondendo a 5,28mm de deslocamento (foto da esquerda da figura 57). Com o avançar do ensaio, novas fissuras apareceram e evoluíram em extensão e em espessura. Durante o quarto ciclo de carga e descarga, correspondente ao deslocamento de 15,86mm, uma fissura teve início na base junto à face Este (E) desenvolvendo-se na diagonal até ao topo da parede, como é possível constatar na foto da direita da figura 57.

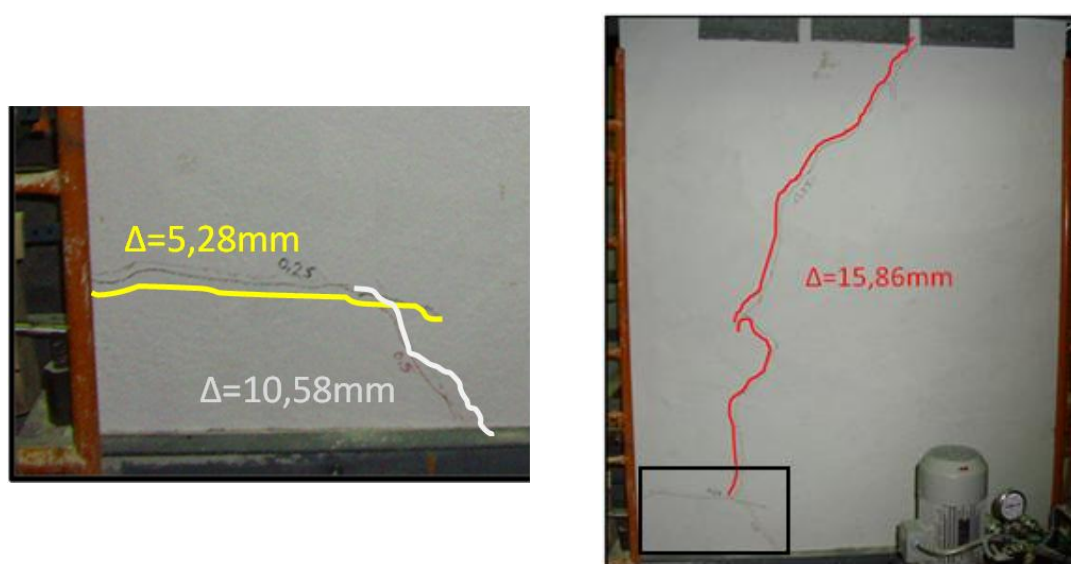


Figura 57: Evolução do dano na parede CST-3 até ao deslocamento imposto de 15,86mm

Com o aumento do deslocamento imposto até ao máximo de 37mm, o dano alastrou-se por toda área da parede. Com os sucessivos ciclos de carga e descarga, as fissuras atingiram espessura apreciável e ocorreram alguns destacamentos do revestimento, de dimensão pouco significativa. Na figura 58, é possível observar as patologias associadas aos respectivos deslocamentos induzidos à parede ao longo do ensaio.



Figura 58: Dano final na parede CST-3

## 7.6 Resultados e considerações gerais

Neste item, comparecem os resultados experimentais e as primeiras conclusões gerais da campanha experimental.

### 7.6.1 Resultados do ensaio de compressão

A figura 59 exibe o gráfico de tensão *versus* deformação relativamente aos ensaios de compressão realizados sobre duas das três paredes construídas de acordo com a técnica C.S.T, identificados por CST-1 e CST-2.

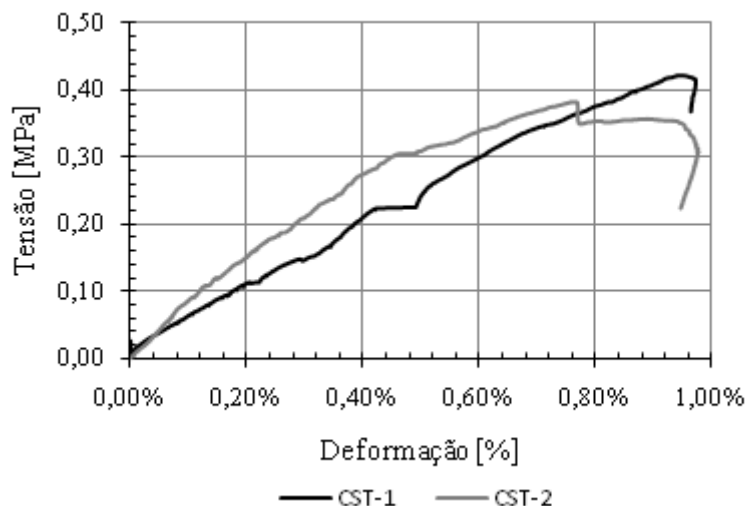


Figura 59: Gráfico de tensão *versus* deformação

Na tabela 24 expõem-se os resultados obtidos de cada parede, nos ensaios de compressão e a respectiva média. Os valores apresentados são referentes à força máximas ( $F_{V,máx.}$ ), deslocamento máximo ( $\delta_{V,máx.}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{V,máx.}$ ) e deformação máxima ( $\epsilon_{V,máx.}$ ).

Tabela 24: resultados dos ensaios de compressão

Parede	$F_{V, máx.}$ [kN]	$\delta_{V, máx.}$ [mm]	$\sigma_{V, máx.}$ [MPa]	$\epsilon_{V, máx.}$ [%]
CST 1	380,55	22	0,42	0,96
CST 2	346,08	22	0,38	0,96
Média	363,32	22	0,40	0,96

Através dos resultados obtidos podem-se retirar, do ensaio de compressão as seguintes conclusões gerais:

- O comportamento de ambos os provetes, CST-1 e CST-2 até se atingir o pico de força e após pico foi muito semelhante, e ambos sofreram o mesmo tipo de rotura frágil;
- A resistência da CST-1 foi superior à CST-2 em 9%;
- A deformação foi igual em ambas as paredes, 22mm;

- A diferença da tensão aparente máxima das paredes é de aproximadamente 11%;
- A capacidade resistente à compressão, em média, para este tipo de parede por metro linear é de 199,62kN, o que corresponde a uma tensão aparente de 0,40Mpa.

### 7.6.2 Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano

Os resultados apresentados resultam da análise do registo do transdutor de deslocamento (LVDT 23) que se encontra aplicado ao nível de aplicação da força na face Este (E), a posição do mesmo pode ser confirmada pela figura 26.

Na figura que se seguem, são apresentadas as curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento.

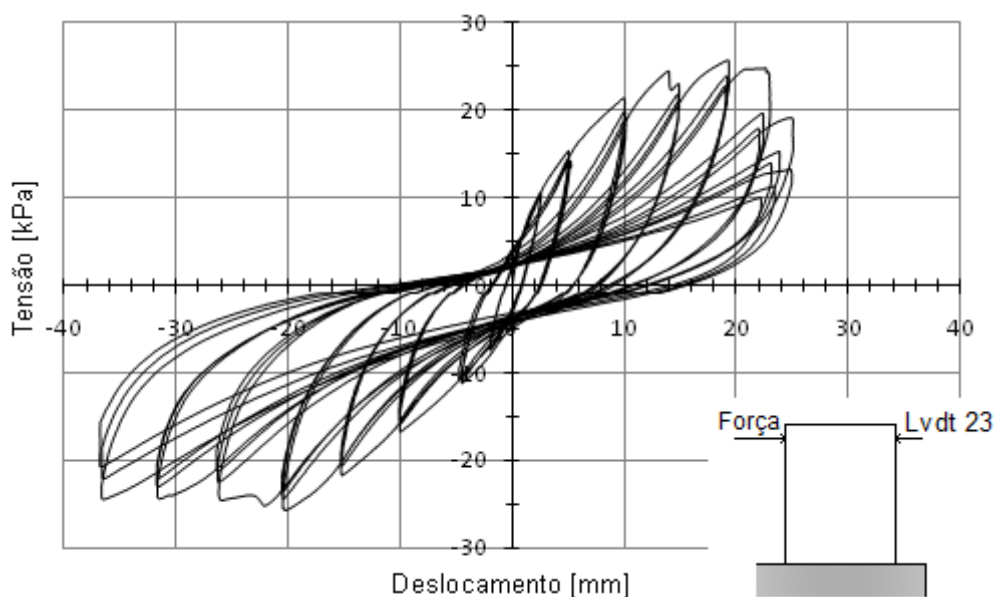


Figura 60: Curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento

Como base nos resultados obtidos pode-se constatar o seguinte:

- O dano ocorreu apenas na face norte da parede o que pode estar associado a vários factores. A sobrecarga poderia ter sido distribuída de forma excêntrica, o reboco da face norte pode ser de espessura inferior ao da face sul, logo menos

resistente. Também poderia ter acontecido que os dois factores tenham ocorrido em simultâneo;

- A força máxima aplicada foi de 20,69kN que equivale ao deslocamento de 21mm e a um *drift* de 1,0%, sendo a tensão máxima aparente de 30kPa.
- Como a resposta da parede CST-3 à solicitação foi assimétrica para deslocamentos impostos superiores a 25,7mm, assim considerou-se esse deslocamento com sendo o máximo admissível para este tipo de parede, que é associado ao *drift* de 1,2%.



## **Capítulo 8**

### **Técnica G.R.E.B – caracterização mecânica de paredes**

## 8 Técnica G.R.E.B – caracterização mecânica de paredes

O capítulo 8 incide sobre a técnica G.R.E.B. Apresenta-a, descreve o processo construtivo, efectua a análise do custo de construção, descreve os ensaios mecânicos e termina apresentação dos resultados.

### 8.1 Descrição da técnica

A técnica de G.R.E.B consiste na construção de uma estrutura tridimensional de madeira que confina os fardos de palha. Estes são utilizados como enchimento e apenas assumem funções de isolamento térmico e acústico. Nesta técnica, foram usados elementos de madeira de Pinho Bravo com igual secção de  $10 \times 4 \text{ cm}^2$ . A ilustração desta técnica pode ser vista na figura 61.

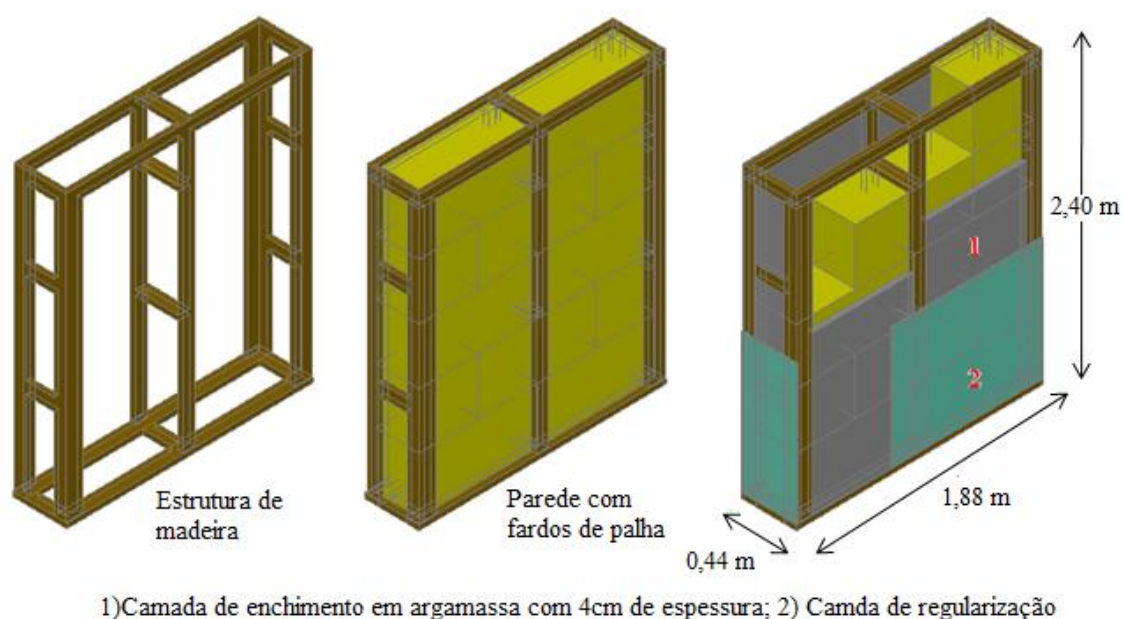


Figura 61: Ilustração da técnica G.R.E.B

Todas ligações entre os diversos elementos de madeira de Pinho Bravo que constituem a estrutura de madeira tridimensional são do tipo cavilha, realizadas com parafusos com  $\varnothing 6 \times 70 \text{ mm}$ .

## 8.2 Processo construtivo da técnica

Primeiramente, antes de se iniciar a construção da estrutura tridimensional de madeira de Pinho Bravo com secção  $10 \times 4 \text{ cm}^2$ , subsistiu a necessidade de efectuar cavidades (figura 62) nos elementos de madeira para alojar a cabeça dos ligadores, nomeadamente nas zonas dos nós da estrutura tridimensional o que permite que o contacto, atrito entre os vários elementos envolvidos, seja mais efectivo e eficiente.



Figura 62: Cavidades para alojar a cabeça dos ligadores

A construção das paredes prosseguiu com a montagem da estrutura tridimensional com 1,88m de comprimento, 2,40m de altura por 0,44m de largura. Sendo as ligações da mesma do tipo cavilha, aparafusadas com parafusos  $\varnothing 6 \times 70 \text{ mm}$ . A figura 63 aponta a estrutura tridimensional de madeira e nas figuras 64 e 65 mostram-se as ligações dos cunhais e dos elementos estruturais verticais com o elemento da base, respectivamente.



Figura 63. Estrutura tridimensional de madeira



Figura 64: Ligação nos cunhais



Figura 65: Lista do exterior da estrutura

Depois de concluída as estruturas tridimensionais das paredes, procedeu-se ao enchimento das mesmas com fardos de palha. O enchimento é relativamente fácil e rápido de concretizar, assim que concluído, a parede está preparada para receber o revestimento. Este foi executado com a argamassa A4, por fases e por camadas. A primeira fase consiste no enchimento entre os fardos até à face exterior dos elementos de madeira, aproximadamente com 4cm de espessura. Executa-se com recurso a uma cofragem fixa aos elementos de madeira da estrutura, retirando-se ao fim de 24 horas de cura, e o aspecto com que ficaram as paredes pode ser observado nas figuras 68 e 69.

A segunda fase materializou-se com a aplicação de uma rede plástica (figura 66, 67) e pela execução das camadas de regularização do reboco. A rede aplicou-se antes da execução das camadas de regularização, foi fixa à estrutura tridimensional com pregos e teve como função evitar e minimizar o aparecimento de fissuras no reboco bem como o destacamento do mesmo nas zonas dos elementos de madeira. Optou-se por este tipo de rede, para além do custo ser substancialmente inferior ao das redes metálicas, porque garantia, na presença de humidade, uma não corrosão no corpo da parede.



Figura 66: Rede *CintoFlex* preta de malha 15x20mm



Figura 67: Fixação da rede plástica *CintoFlex*

Concluída a fixação da rede plástica, seguiu-se a realização das camadas de regularização sendo que todo o processo desta fase se encontra representado nas figuras 68 e 69.



Figura 68: Execução da camada de regularização



Figura 69: Parede rebocada

### 8.3 Contabilização dos custos

Na contabilização do custo de construção por metro quadrado, consideram-se os preços dos materiais e da mão de obra praticados de Março a Setembro de 2010. Os rendimentos determinaram-se com base no tempo despendido na execução das paredes. Na tabela 25 encontram-se os preços dos materiais utilizados, as quantidades e o custo do material por metro quadrado de parede que é de 25,04€/m<sup>2</sup>. Os preços dos vários operários, o número de elementos por equipa de trabalho, o rendimento e o preço da mão-de-obra por metro quadrado de parede, que é de 25,06€/m<sup>2</sup> são expostos na tabela 26.

Tabela 25: Contabilização do custo do material por m<sup>2</sup>

Material			
Designação	Custo	Quantidade	€/m <sup>2</sup>
Elementos de madeira de Pinho de secção (10×4cm <sup>2</sup> )	520,00 €/m <sup>3</sup>	0,33 m <sup>3</sup>	13,02
Fardos de palha	2,50 €/un	30 un	5,54
Ligadores, parafusos (Ø6×70mm)	0,04 €/un	264 un	0,68
Rede plástica, <i>Cintoflex</i>	0,72 €/m <sup>2</sup>	36,9 m <sup>2</sup>	1,96
Argamassa	44,00 €/m <sup>3</sup>	1,54 m <sup>3</sup>	5,01
Total			26,22

Tabela 26: Contabilização do custo da mão de obra por m<sup>2</sup>

Mão-de-obra						
Tarefa	un	Equipa de trabalho			Rendimento h/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>
		nº	Operário	€/h		
Execução da estrutura em madeira de Pinho de secção 10×4cm <sup>2</sup>	h	1	1º Oficial de carpinteiro	13,7	0,44	6,03
Corte e aplicação da rede plástica <i>Cintoflex</i>	h	1	Pedreiro	8,2	0,098	1,38
		1	Servente	5,9		
Assentamento dos fardos, aplicação de cofragem, produção da argamassa, realização do enchimento dos 4cm e a descofragem	h	1	Pedreiro	8,2	1,5	12,30
Produção da argamassa e realização do reboco das paredes	h	1	Servente	5,9	0,24	5,35
		2	Pedreiro	8,2		
					Total	25,06

Ao examinar-se o custo de construção das paredes erguidas em conformidade com a técnica de G.R.E.B pode-se dizer que o preço por metro quadrado é de 51,28€, destes, 48,8% são da responsabilidade da mão-de-obra e os restantes 51,2% estão associados ao material.

## 8.4 Descrição dos ensaios mecânicos

Aqui, neste ponto descrevem-se os ensaios e explica-se a evolução do dano no desenrolar dos ensaios realizados às paredes construídas segunda a técnica G.R.E.B.

### 8.4.1 Descrição dos ensaios de compressão

Nestas paredes, as primeiras fissuras surgiram com orientação vertical na zona dos cunhais, quando se aplicou a carga de 100kN. Com o aumento da carga no decorrer do ensaio, as fissuras progrediram em extensão ao longo dos elementos de madeira e com a orientação dos mesmos, na vertical e horizontal. Para cargas superiores a 350kN, surgiram novas fissuras na diagonal e as existentes evoluíram de forma agressiva. De tal modo, que surgiram fendas, destacamento da argamassa de recobrimento dos elementos de madeira, esmagamento do reboco e abaulamento do mesmo para fora do plano. Na

parede GREB-1, a rotura foi causada pelo esmagamento do elemento de madeira horizontal na base da parede, onde se encontram apoiados os elementos verticais do cunhal. Na parede GREB-2, a rotura também foi provocada por cedência de uma ligação num dos cunhais, no topo da parede. Esta sucedeu por inexistência de um ligador, erro construtivo. Ambas as paredes entraram em rotação em relação ao eixo vertical e ao eixo longitudinal da parede, após as cedências das ligações mencionadas anteriormente.

Durante o desmantelamento da parede GREB-1 foi possível verificar que os elementos de madeira apresentavam patologias nas zonas das ligações. Na tabela 27, pode-se ver o registo fotográfico das roturas das ligações das paredes e as roturas dos elementos de madeira.

Tabela 27: Rotura nos elementos de madeira



Esmagamento na ligação da base do cunhal, da parede GREB-1



Rotura paralela às fibras, do elemento vertical na ligação com a viga, da parede GREB-1



Rotura perpendicular às fibras, da parede GREB-1



Rotura da ligação no topo do cunhal, parede GREB-2

O dano geral sofrido no decorrer do ensaio de compressão da parede GREB-2 pode ser notado na figura 70, da parede GREB-1 não se encontra registado por lapso.





Face Norte



Face Sul

Figura 70: Dano na parede GREB-2

#### 8.4.2 Descrição do ensaio cíclico horizontal no plano

Na parede de G.R.E.B, as fissuras começaram a ser visíveis nos cunhais para um deslocamento induzido de 5,28mm superficialmente e com pouca profundidade, restringindo-se à última camada de reboco e coincidentes com os elementos de madeira. Prosseguindo o ensaio, mais fissuras apareceram de forma generalizada nas zonas das ligações da estrutura de madeira para o deslocamento de 15,88mm. Quando o ciclo de 26,44mm de deslocamento terminou todas as áreas da parede onde se localizam os elementos de madeira estavam com fissuração pouco intensa. Nesta fase, já se explorava a ductilidade do elemento, uma vez que a força máxima aplicada de 29 kN registou-se para o deslocamento de 21,15mm. A ductilidade foi explorada até se atingir a instabilidade do elemento, rotura iminente, que aconteceu quando se alcançou um deslocamento máximo de 82,8mm, ao qual é associada a força de 20,6kN. Ao longo da exploração da ductilidade detectou-se que as fissuras tornaram-se mais intensas para deslocamentos superiores a 42,30mm. Nas figuras 71 e 72 é possível ver o estado em que a parede ficou após o ensaio.



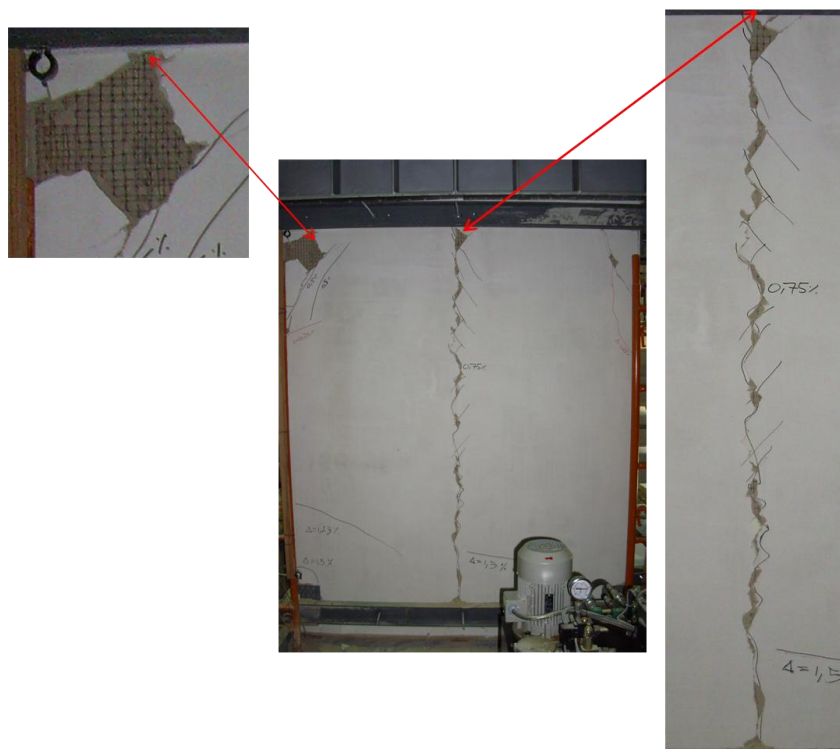


Figura 71: Dano na face Norte da parede GREB-3



Figura 72: Dano na face Sul da parede GREB-3

## 8.5 Resultados e considerações gerais

Apresentam-se os resultados e as primeiras conclusões gerais referentes a cada tipo de ensaio produzido.

### 8.5.1 Resultados do ensaio de compressão

Na figura 73 é possível observar os gráficos de tensão *versus* deformação relativos aos ensaios de compressão das duas paredes GREB-1 e GREB-2.

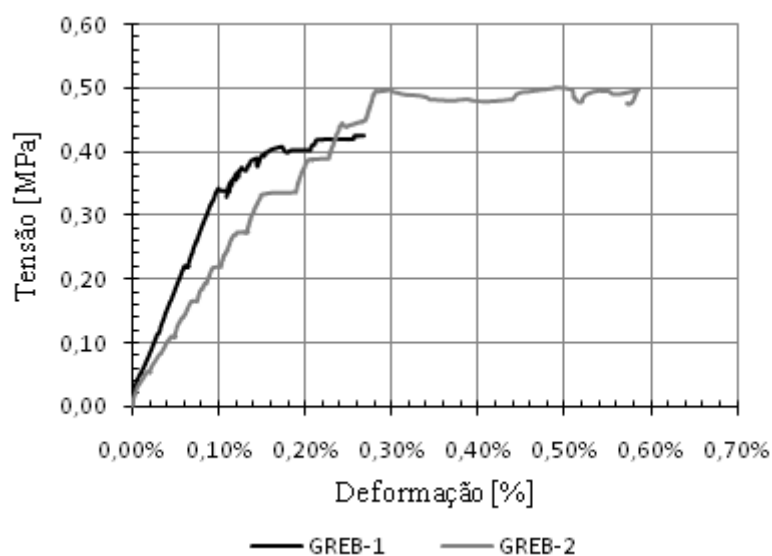


Figura 73: Gráfico de tensão *versus* deformação

Na tabela 28 indicam-se os resultados obtidos, para cada parede, nos ensaios de compressão e a respectiva média. Os valores apresentados são referentes à força máximas ( $F_{V,máx.}$ ), deslocamento máximo ( $\delta_{V,máx.}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{V,máx.}$ ) e deformação máxima ( $\epsilon_{V,máx.}$ ).

Tabela 28: Resultados dos ensaios de compressão

Parede	$F_{V, máx.}$ [kN]	$\delta_{V, máx.}$ [mm]	$\sigma_{V, máx.}$ [MPa]	$\epsilon_{V, máx.}$ [%]
1	444,05	6,02	0,49	0,27
2	453,3	13,20	0,50	0,57
Média	448,68	9,61	0,495	0,42

Através dos resultados obtidos podem-se retirar, do ensaio de compressão as seguintes conclusões gerais:

- O comportamento mecânico das duas paredes até ao pico de força foi muito parecido, mas após o pico a parede 2 apresentou um patamar de cedência, até à rotura que corresponde a 50% da deformação, enquanto, que na parede 1 o patamar de cedência é de 34% da deformação.
- A deformação foi muito diferente, a parede 2 sofreu mais do dobro da deformação da parede 1, este facto está associado à rotura da ligação do cunhal no topo da parede;
- A tensão aparente máxima é praticamente igual para ambas as paredes, 0,49MPa na parede GREB- e de 0,50MPa na parede GREB-2;
- A capacidade média resistente de carga, para este tipo de parede por metro linear é de 238,66kN, o que corresponde a uma tensão aparente de 0,495Mpa.

### 8.5.2 Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano

Da análise do registo do transdutor de deslocamento (LVDT 23), que se encontra aplicado na face Este (E) ao nível da aplicação do deslocamento, deu origem às curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento que se encontra na figura 74.

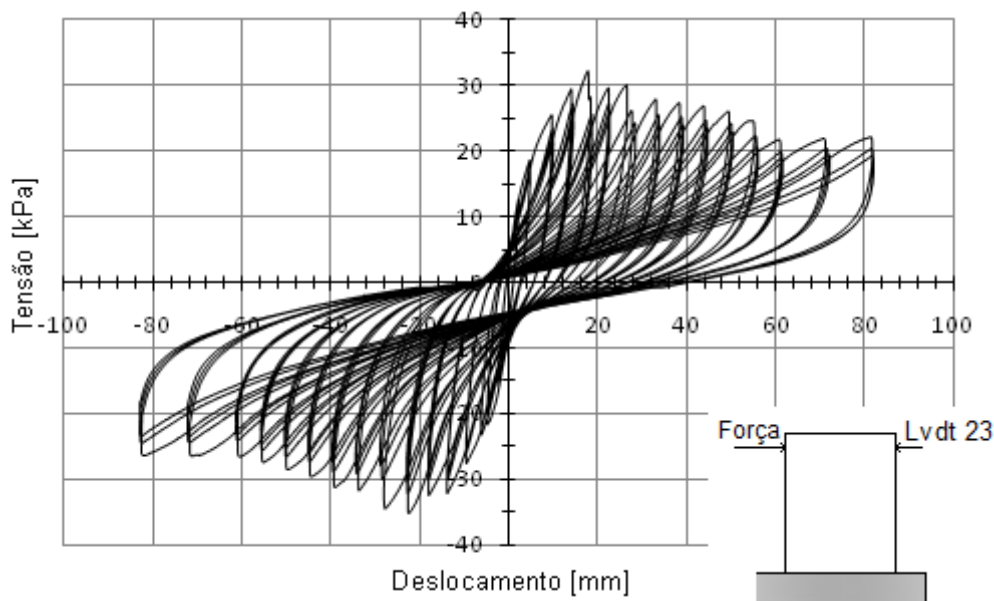


Figura 74: Curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento

Dos resultados obtidos observou-se o seguinte:

- O deslocamento máximo imposto à parede foi de 84,6mm, sendo no nível de aplicação da força de 82,88mm correspondendo ao *drift* de 4%;
- O início da fissuras aconteceu no ciclo de deslocamento induzido de 5,28mm;
- A resistência máxima da parede foi de 29kN à qual corresponde o deslocamento de 21mm que remete a um *drift* de 1%, sendo a tensão máxima aparente de 34kPa;
- A fissuração intensa deu-se pós pico de força que foi de 29kN;
- Também de pode dizer que na exploração da ductilidade, o deslocamento máximo obtido foi de 82mm, para uma tensão de 22,5kPa o que corresponde a 66% da tensão máxima aparente.

## **Capítulo 9**

### **Técnica Abarrotar – caracterização mecânica de paredes**

## 9 Técnica Abarrotar – caracterização mecânica de paredes

Este capítulo anuncia a técnica Abarrotar, explica a sua origem e justifica o nome da mesma. Realiza ainda a descrição do processo construtivo e contabiliza o seu custo. É, igualmente, descrito o comportamento mecânico das paredes no decorrer dos ensaios e apresentam-se os resultados.

### 9.1 Descrição da técnica

A Técnica Abarrotar pode-se considerar o resultado da combinação entre a Técnica G.R.E.B e a Gaiola Pombalina. O termo construtivo abarrotar, que lhe dá nome, deve-se a definição do mesmo: *“tipo de construções em madeira, constituídas por uma estrutura em forma de grade, que seria preenchida com alvenaria ou taipa, no séc. XVIII foi designado como gaiola de frontais pombalinos e mais tarde passa a chamar-se simplesmente gaiola”* (Ruas & Peixeiro,).

Esta técnica foi desenvolvida com o intuito de atingir um bom desempenho às solicitações horizontais no plano. Para tal, criou-se uma treliça de madeira de características mecânicas e físicas iguais às dos elementos verticais. As ligações nos nós foram executadas com chapas metálicas em aço galvanizado com 2mm de espessura. É de salientar, que os nós são rotulados para permitir movimento e consequentemente dissipar energia.

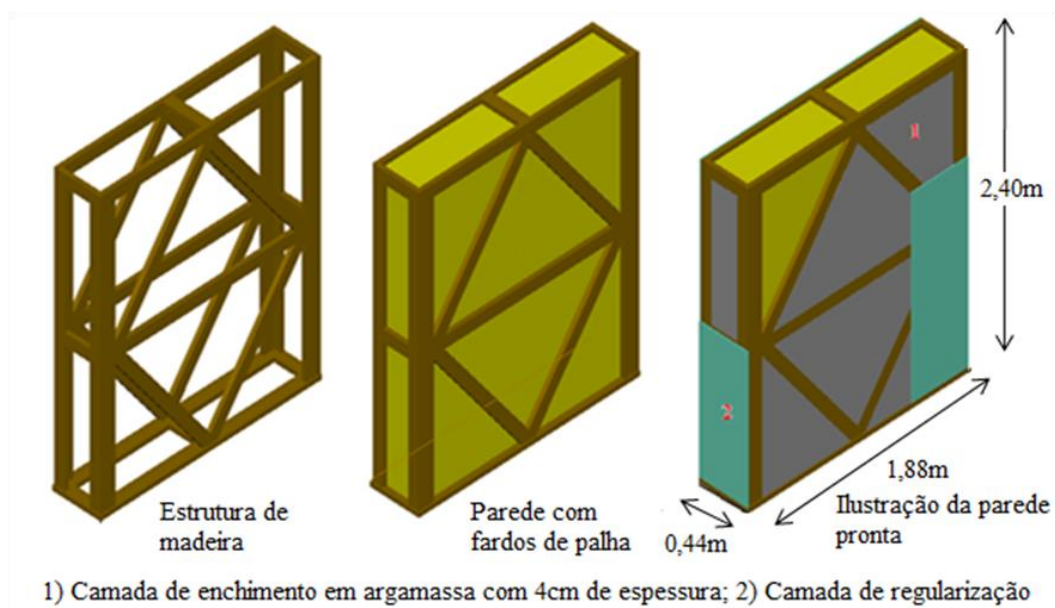


Figura 75: Ilustração da Técnica Abarrotar

As ligações da Treliça são reforçadas com chapas de aço galvanizado com 2 mm de espessura, as restantes são executadas com parafusos.

## 9.2 Processo construtivo da técnica

O processo construtivo da técnica Abarrotar é semelhante ao da técnica G.R.E.B, tendo-se inclusive empregue elementos de madeira com a mesma secção ( $10 \times 4 \text{ cm}^2$ ) e realizado cavidades para alojar a cabeça dos ligadores  $\varnothing 6 \times 70 \text{ mm}$ .

A construção das três paredes com 1,88m de comprimento, 2,40m de altura por 0,44m de largura prosseguiu com a montagem da estrutura tridimensional de madeira, esta é composta por vários elementos com várias dimensões em madeira de Pinho, de secção  $10 \times 4 \text{ cm}^2$ . A montagem da estrutura teve a seguinte ordem, elementos horizontais da base, elementos verticais e os elementos da viga, só depois é que se efectuou a montagem da treliça. As ligações da treliça aos restantes elementos de madeira da estrutura, ligações rotuladas foram realizadas recorrendo a um ligador  $M8 \times 80 \text{ mm}$  e a ligação dos elementos de madeira da treliça às chapas foi efectuada com parafusos  $\varnothing 4 \times 35 \text{ mm}$ .

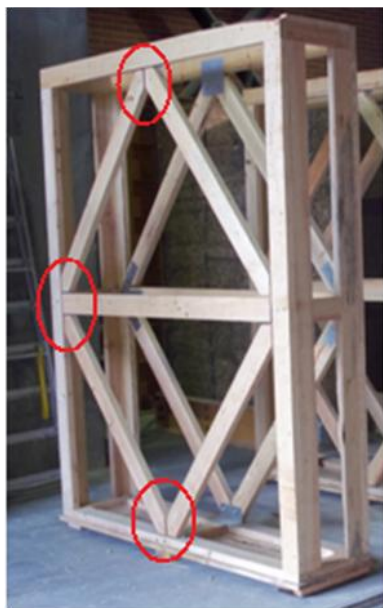


Figura 76: Estrutura tridimensional de madeira



Figura 77: Vista do exterior da estrutura



Figura 78: Vista pelo interior da estrutura



Figura 79: Vista do exterior da estrutura



Figura 80: Vista pelo interior da estrutura



Figura 81: Vista do exterior da estrutura



Figura 82: Vista pelo interior da estrutura

Concluída a estrutura, continuaram-se os trabalhos de construção das paredes com o enchimento das mesmas com os fardos e palha, que é uma tarefa que se realiza com relativa facilidade, quando terminada pode-se começar a preparar as paredes para receberem a primeira camada de argamassa. Esta consiste no enchimento entre os fardos até à face exterior dos elementos de madeira, aproximadamente com 4cm de espessura. Executa-se com recurso a uma cofragem fixa aos elementos de madeira da estrutura, retirando-se ao fim de 24 horas de cura, ver figura 83. A segunda camada de argamassa, camada de recobrimento da estrutura da madeira com 1cm de espessura executou-se depois de terminada a aplicação da rede *Cintoflex* (figura 84) e o aspecto final da parede pode ser observado na figura 85.





Figura 83: Parede com enchimento de 4cm em argamassa



Figura 84: Realização da camada de regularização



Figura 85: Paredes rebocada

### 9.3 Contabilização dos custos

A contabilização dos custos realizou-se com base nos preços unitários praticados de Março a Setembro de 2010. Relativamente à mão de obra, os rendimentos das várias etapas da construção das paredes foram determinados com base no tempo gasto pelas equipa de trabalho na execução das mesmas. Na tabela 26 expõem-se os preços dos materiais utilizados, a quantidade e o custo do material por metro quadrado de parede que é de 41,43€/m<sup>2</sup>. Na tabela 26 anuncia-se o custo por operários, os elementos das equipas de trabalho, o rendimento e o preço da mão-de-obra por metro quadrado de parede, que é de 25,06€/m<sup>2</sup>.

Tabela 29: Contabilização do custo do material por m<sup>2</sup>

Material				
Designação	Custo	Quantidade	€/m <sup>2</sup>	
Elementos de madeira de Pinho de secção (10×4cm <sup>2</sup> )	520,00 €/m <sup>3</sup>	0,38 m <sup>3</sup>	14,60	
Fardos de palha	2,50 €/un	30 un	5,54	
Parafusos, 35mm	0,03 €/un	258 un	0,53	
Parafusos, M8	0,08 €/un	30 un	0,18	
Ligadores, parafusos (Ø6×70mm)	0,04 €/un	264 un	0,68	
Chapas de ligação em aço galvanizado	175,00 €	24 un	12,93	
Rede plástica, <i>Cintoflex</i>	0,72 €/ m <sup>2</sup>	36,90 m <sup>2</sup>	1,96	
Argamassa	44,00 €/ m <sup>3</sup>	1,54 m <sup>3</sup>	5,01	
Total			41,43	

Tabela 30: Contabilização do custo da mão de obra por m<sup>2</sup>

Mão de obra						
Tarefa	un	Equipa de trabalho			Rendimento h/m <sup>2</sup>	€/m <sup>2</sup>
		nº	Operário	€/h		
Execução da estrutura em madeira de Pinho de secção 10×4cm <sup>2</sup>	h	1	1º Oficial de carpinteiro	13,7	0,44	6,03
Corte e aplicação da rede plástica (Cintoflex)	h	1	Pedreiro	8,2	0,098	1,38
		1	Servente	5,9		
Assentamento dos fardos, aplicação de cofragem, produção da argamassa, realização do enchimento dos 4cm e a descofragem	h	1	Pedreiro	8,2	1,5	12,30
Produção da argamassa e realização do reboco das paredes	h	1	Servente	5,9	0,24	5,35
		2	Pedreiro	8,2		
					Total	25,06

Ao examinar-se o custo de construção das paredes erguidas em conformidade com a técnica de G.R.E.B pode-se dizer que o preço por metro quadrado é de 66,49€, dos quais, 62,7% correspondem ao gasto referentes aos materiais e os 37,3% recaem sobre o custo da mão-de-obra.

## 9.4 Descrição dos ensaios mecânicos

Realiza-se a descrição dos ensaios mecânicos acompanhados com evolução do dano causado pelos mesmos.

### 9.4.1 Descrição dos ensaios de compressão

Nas paredes da técnica abarrotar, o dano mais significativo localizou-se na envolvente da Treliça. Onde apareceram as primeiras fissuras com a orientação dos elementos diagonais, quando aconteceu o carregamento de 100kN. As fissuras percorreram o perímetro da treliça e aumentaram de espessura com o desenvolvimento do ensaio de compressão, até que sucedeu o destacamento da argamassa de recobrimento da madeira. Após pico de força instalou-se a rotação em torno do eixo vertical e longitudinal da parede (efeito caixa) que provocou a instabilidade das mesma, nesta fase o ensaio deu-se por terminado uma vez que a colapso era iminente. Nas figuras 86 e 87 pode ser observado o dano geral nas paredes Ab-1 e na Ab-2.



Face Norte



Face sul

Figura 86: Dano na parede Ab-1



Face Norte



Face Sul

Figura 87: Dano na parede Ab-2

#### 9.4.2 Descrição do ensaio cíclico de carga horizontal no plano

Na parede Abarrotar as fissuras tomaram-se visíveis no ciclo de 10,58mm de deslocamento, nomeadamente ao longo dos elementos de madeira da treliça. No

decorrer do ensaio, até se alcançar o deslocamento de 21,15mm, as fissuras alastraram-se a toda a treliça e, durante esse processo, detectou-se a abertura e fecho das fissuras. Este fenómeno pode dever-se aos movimentos dos elementos da treliça provocados pelo deslocamento imposto. Até ao termo do ensaio as fissuras tornaram-se mais agressivas, profundas e nas zonas das ligações entre treliça com restantes elementos da estrutura originou-se um género de rendilhado de fissuras de diferente espessura. O ensaio terminou quando a parede se tornou instável, por rotação da mesma relativamente ao plano da base (figura 90). Nas figuras 88 e 89 é possível observar os danos sofridos pela parede ao longo do ensaio.

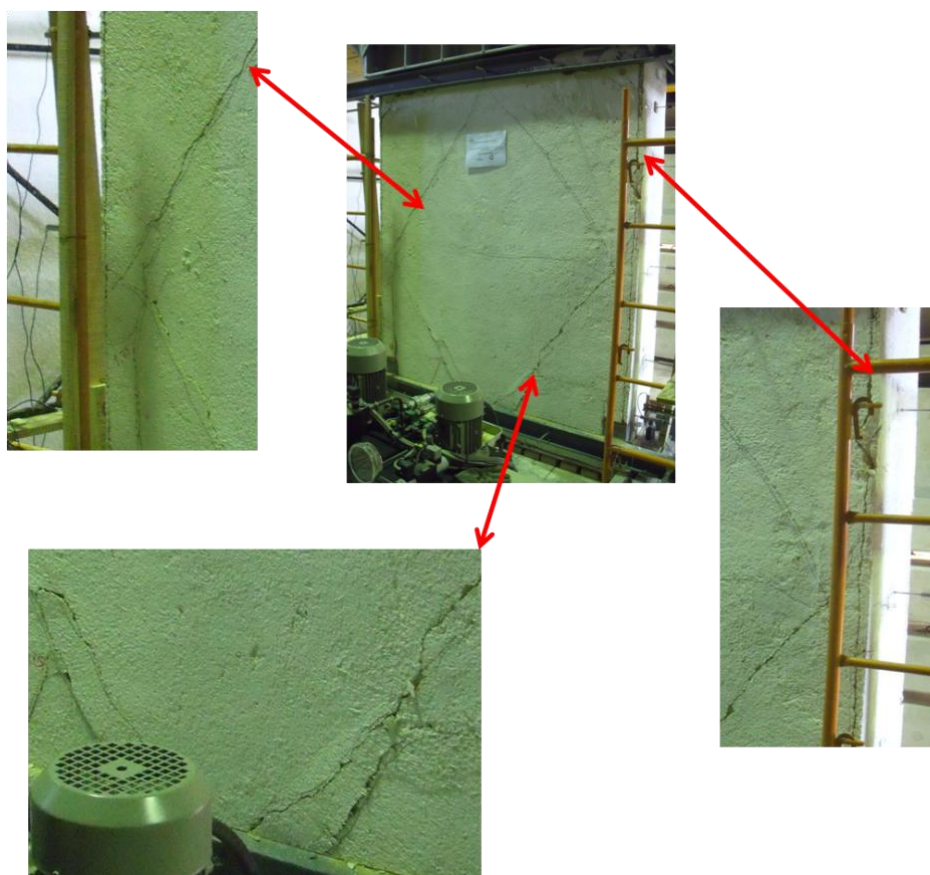


Figura 88: Dano na face Norte da parede Ab-3

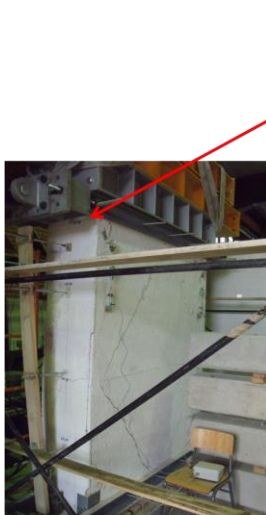


Figura 89: Dano na face sul da parede Ab-3

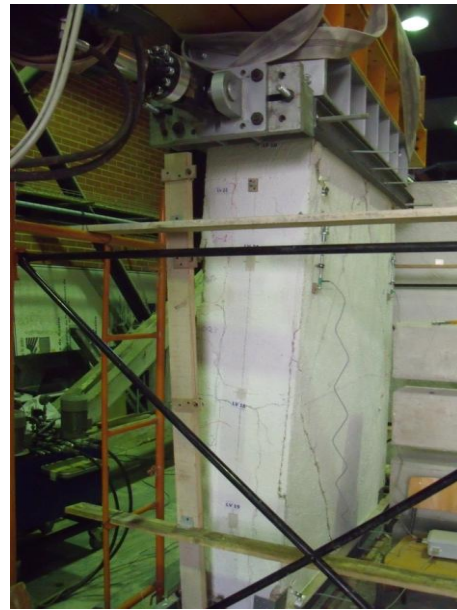


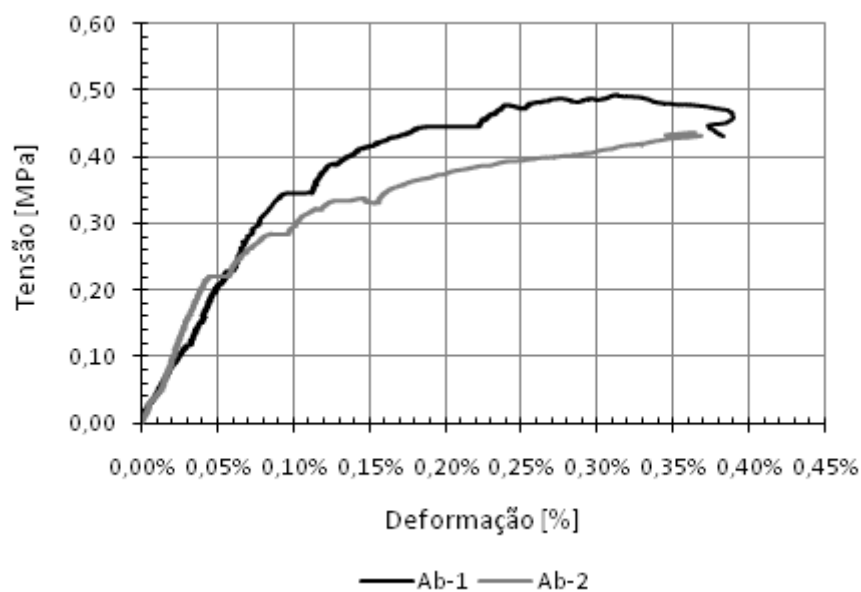
Figura 90: Rotação da parede Ab-3

## 9.5 Resultados e considerações gerais

Neste ponto, expõem-se os resultados e as primeiras conclusões gerais referentes a cada tipo de ensaio efectuado.

### 9.5.1 Resultados do ensaio à compressão

Os gráficos de tensão *versus* deformação dos ensaios de compressão das duas paredes, denominadas por Ab-1 Ab-2 podem ver-se na figura.

Figura 91: Gráficos de tensão *versus* deformação

Os valores da força máxima ( $F_{V,máx.}$ ), do deslocamento máximo ( $\delta_{V,máx.}$ ), da tensão máxima ( $\sigma_{V,máx.}$ ) e a deformação máxima ( $\epsilon_{V,máx.}$ ), que resultaram da análise dos registos dos transdutores (LVDT's) e dos potenciômetros são expostos na tabela 31.

Tabela 31: Resultados dos ensaios de compressão

Parede	$F_{V, máx.}$ [kN]	$\delta_{V, máx.}$ [mm]	$\sigma_{V, máx.}$ [MPa]	$\epsilon_{V, máx.}$ [%]
1	443,72	8,8	0,49	0,39
2	415,38	8,4	0,46	0,37
Média	429,55	8,6	0,475	0,38

Com base nos resultados apresentados na tabela anterior é possível retirar as seguintes conclusões do ensaio de compressão:

- O comportamento mecânico das paredes foi linear até sensivelmente 0,1% da deformação, depois passou a ser não linear;
- A parede 1 apresentou maior capacidade resistente, maior tensão e sofreu mais deformação, consequentemente o maior deslocamento;
- A capacidade resistente entre as paredes deferiu em 28,17kN que corresponde 6,35% de variação;
- A capacidade média resistente de carga, para este tipo de parede por metro linear é de 228,48kN/m, o que corresponde a uma tensão média aparente de 0,475MPa.

### 9.5.2 Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano

As curvas histeréticas ilustradas na figura 89 resultaram da análise do transdutor (LVDT 23), que se encontra ao nível de aplicação da força na face Este (E), ver figura 27.



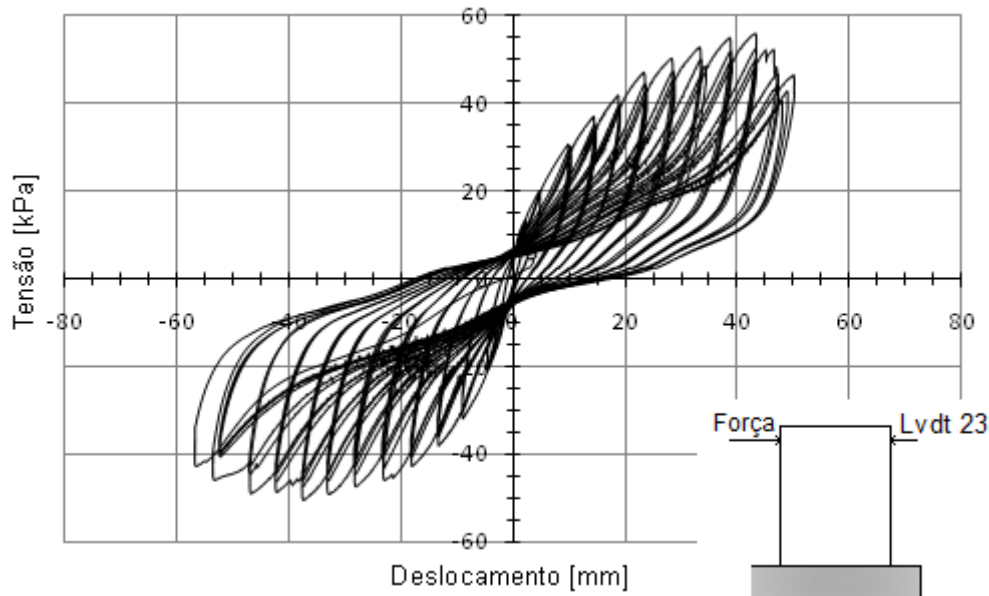


Figura 92: Curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento

Dos resultados obtidos observou-se o seguinte:

- O deslocamento máximo imposto à parede foi de 58,16mm, sendo no nível de aplicação da força de 57mm correspondendo ao *drift* de 2,0% para uma tensão máxima aparente de 46,4kPa;
- O início da fissuração ocorreu no ciclo de deslocamento induzido de 10,58mm;
- A resistência máxima da parede foi de 46,4kN à qual corresponde o deslocamento de 42,5mm que remete a um *drift* de 2,0% e para uma tensão de 55kPa;
- A fissura intensa sucedeu pós pico de força e a rotura da parede.

## **Capítulo 10**

### **Comparação de resultados, considerações finais e desenvolvimentos futuros**



## **10 Comparação de resultados, considerações finais e desenvolvimentos futuros**

No presente capítulo é feita a análise comparativa dos resultados obtidos na campanha experimental e são discutidas as principais conclusões. São ainda enunciadas algumas possíveis linhas de orientação para estudos futuros.

### **10.1 Comparação de resultados**

Inicialmente comparam-se os resultados obtidos nos ensaios das paredes com as quatro técnicas em estudo (ver tabela 32 da pág. 116). Seguidamente, estes resultados são confrontados com os resultados de estudos anteriores desenvolvidos por outros autores.

Relativamente aos resultados médios dos ensaios de compressão vertical, constatou-se que as paredes construídas com as técnicas G.R.E.B. e Abarrotar apresentaram maior resistência, e são muito semelhantes entre elas (238,66kN/m e 228,48kN/m, respectivamente). As paredes construídas com a técnica Nebraska Armada apresentam o valor médio de resistência à compressão mais baixo, que foi de 104kN/m (equivalente a uma tensão vertical média de 0,22MPa). Essa capacidade de carga por metro linear é 43,4% inferior à da técnica de G.R.E.B mas tem um custo construtivo por m<sup>2</sup> menor, cerca de 43,6%. A resistência à compressão das paredes da técnica C.S.T foi de 199,62kN/m, que é inferior em 39,04kN/m relativamente à melhor performance obtida, que foi de 238,66kN/m.

Da análise conjunta dos gráficos da figura 93, pode-se dizer que as paredes das técnicas de G.R.E.B e Abarrotar tiveram um comportamento congénere. Pode-se também dizer que, as paredes das técnicas Nebraska Armada e C.S.T apresentaram comportamento diferente das demais e ambas sofreram rotura frágil.

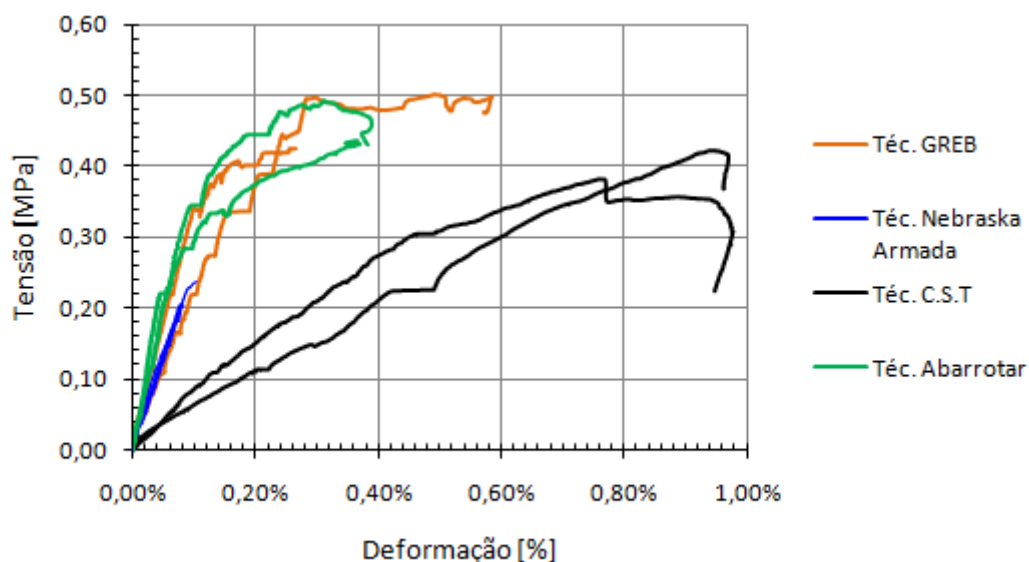


Figura 93: Gráficos de tensão *versus* deformação

Uma vez que os ensaios anteriores de compressão vertical foram realizados em paredes construídas com técnicas de fardos de palha portadores, apenas foi possível compará-los com base nos resultados das paredes da técnica Nebraska Armada. Estes compararam-se com os resultados dos ensaios de Platts, *et al.*, 1996, Carrick, *et al.*, 1998, Dreger, *et al.*, 2002 e Faine, *et al.*, 2002 e pode-se proferir que a resistência à compressão vertical por metro linear foi melhorada em 14kN/m. De certo que a diferença é pouco significativa mas há que considerar que esta melhoria foi conseguida com a uma argamassa de revestimento com resistência à compressão substancialmente inferior a 6,9MPa.

Quanto ao desempenho das paredes nos ensaios cíclicos de cargas horizontais crescentes no plano, a parede da técnica Abarrotar apresentou uma maior resistência de corte, que corresponde a 55kPa de tensão máxima aparente para um *drift* de 2%. As restantes técnicas, para o pico de tensão apresentaram valores semelhantes de tensão e de *drift*, tal como se pode constatar na tabela 32. Após o pico de tensão, a parede que, maior deslocamento sofreu, foi construída em concordância com a técnica G.R.E.B atingindo 82,88mm de deslocamento que equivale a 4% *drift*.

Através da figura 94, onde figuram as envolventes das curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento do ensaio cíclico horizontal no plano, observa-se o comportamento das paredes construídas de acordo com as técnicas em estudo neste trabalho. Constata-se que, até ao pico de tensão o comportamento é parecido, embora para níveis de tensão e de deslocamento diferentes. As paredes das técnicas Nebraska Armada, G.R.E.B e

C.S.T atingiram o pico de tensão praticamente com o mesmo deslocamento. Após o pico de tensão, a parede da técnica G.R.E.B exibiu maior ductilidade, alcançando 82,88mm de deslocamento com 70% da resistência máxima.

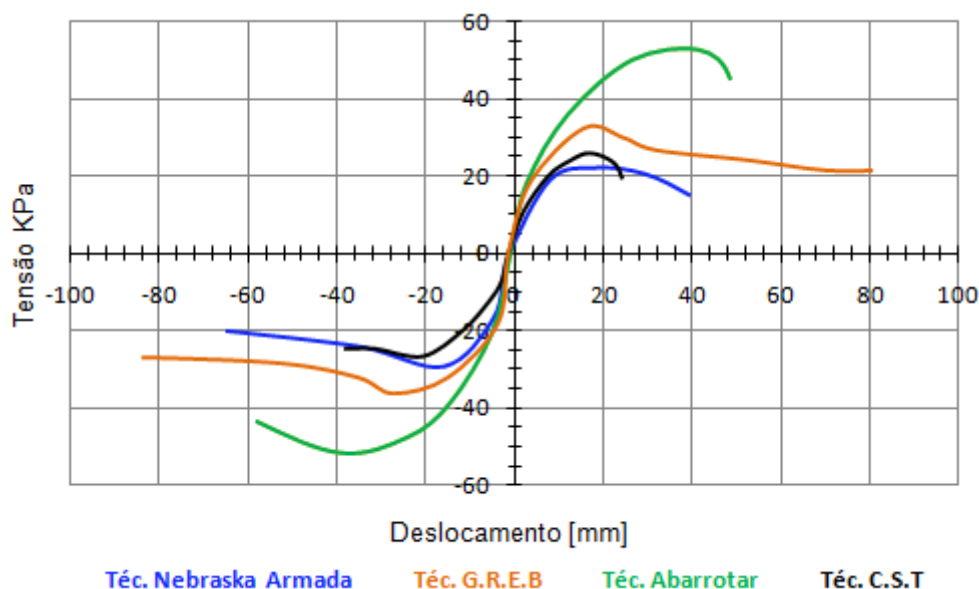


Figura 94: Envoltentes das curvas histeréticas de tensão *versus* deslocamento

Por se tratarem, de técnicas do mesmo grupo “Técnicas de fardos de palha portadores”, apenas se compararam os resultados do ensaio cíclico horizontal no plano da parede NA-3 com os resultados do ensaio de Ash, *et al.*, 2003. Da comparação, retiraram-se as seguintes ilações: a parede NA-3 apresentou maior resistência do que as paredes A e B; apresentou também maior *drift* associado à força máxima do que a parede B mas inferior à parede A. Relativamente às paredes C, D, E e F, a parede NA-3 teve um pior desempenho, menor força máxima, menor *drift* para força máxima e inferior força associada ao deslocamento máximo. No entanto, há que considerar as características das paredes envolvidas na comparação, que diferem em vários aspectos, tais como, espessura do revestimento, argamassa de revestimento, tipo de reforço e assentamento dos fardos. Todos estes factores podem influenciar o comportamento mecânico de uma parede construída com fardos de palha.

Tabela 32: Dados de comparação

Técnicas	Resultados dos ensaios de compressão					Resultados do ensaio cíclico horizontal no plano				Custo €/m <sup>2</sup>
	$F_{V, \text{máx.}}$ [kN]	$\delta_{V, \text{máx.}}$ [mm]	$\sigma_{V, \text{máx.}}$ [MPa]	$\varepsilon_{V, \text{máx.}}$ [%]	$F_{V, \text{máx.}}$ [kN/m]	$\sigma, \text{máx.}$ [kPa]	<i>Drift</i> da $\sigma, \text{máx.}$ [%]	$\delta, \text{máx.}$ [mm]	<i>Drift</i> da $\delta, \text{máx.}$ [%]	
Nebraska Armada	195,95	3,91	0,22	0,09	104	28	1,2	40,46	1,91	27,88
C.S.T	363,32	22	0,40	0,96	199,62	30	1,0	25,7	1,2	50,27
G.R.E.B	448,68	9,61	0,495	0,42	238,66	34	1,0	82,84	4,0	51,28
Abarrotar	429,55	8,6	0,475	0,38	228,48	55	2,0	57	2,2	66,49

Considerando apenas o custo construtivo por metro quadrado (ver tabela 32), a técnica Nebraska Armada é a mais económica e a técnica Abarrotar é a mais dispendiosa. No entanto, o custo construtivo da técnica Abarrotar pode ser reduzido para valores próximos aos das técnicas C.S.T e G.R.E.B, alterando as dimensões e a geometria das peças metálicas das ligações da treliça, uma vez que são as responsáveis pelo aumento do custo construtivo.

## 10.2 Considerações finais

As conclusões retiradas deste trabalho baseiam-se em vários aspectos entre os quais a comparação do processo construtivo das várias técnicas testadas em laboratório, o custo associada a cada uma delas, o comportamento mecânico das paredes quando solicitadas à compressão vertical e quando solicitadas a cargas cíclicas horizontais no plano.

Relativamente ao processo construtivo, todas as técnicas são de fácil execução, no entanto existem diferenças entre elas:

- O assentamento dos fardos é mais rápido execução na técnica Nebraska Armada;
- O processo construtivo das técnicas C.S.T, G.R.E.B e Abarrotar é mais elaborado e demorado, porque é necessário montar as estruturas de madeira, estas dificultam a colocação dos fardos de palha, sendo este facto mais evidente na técnica C.S.T.

Na execução do revestimento em argamassa, surgiram dificuldades na realização da camada de chapisco, principalmente nas técnicas Nebraska Armada e C.S.T. Na técnica Nebraska Armada, a dificuldade prendia-se em atravessar a malha apertada da rede metálica devido à existência de fibras de madeira na composição da argamassa. Estas foram removidas da composição para solucionar o problema. Na técnica C.S.T, o problema residiu na adesão da argamassa aos fardos de palha, contrariedade esta que foi ultrapassada com a modificação da composição da mesma e no modo de aplicação. A argamassa A4 deixou de possuir areia e foi chapada na diagonal em relação às fibras de palha passando, assim, a aderir com normalidade. Por estes motivos, é aconselhado que a argamassa de chapisco seja leve, de textura “líquida” e chapada na diagonal relativamente à orientação das fibras da palha.

Com base nos resultados obtidos pelos ensaios realizados às paredes, foi possível conhecer o comportamento mecânico e a capacidade resistente das técnicas estudadas. Este conhecimento irá permitir interpretar patologias estruturais, mais comuns nas habitações existentes, possibilitará também a construção de moradias com os níveis de segurança actuais.

A armadura usada na técnica Nebraska Armada poderá ter contribuído para o aumento da capacidade de carga por metro linear e ser a responsável pela dissipação de energia no ensaio cíclico horizontal no plano.

A rede *Cintoflex*, aplicada na técnica G.R.E.B e na Abarrotar não evitou o destacamento da argamassa de recobrimento da estrutura de madeira mas minimizou essa patologia.

Os fardos usados na construção das paredes tinham uma densidade média de 108,95 kg/m<sup>3</sup>, o que corresponde a 1,07kN/m<sup>3</sup>.

### **10.3 Possíveis linhas de desenvolvimentos futuros**

Acerca da continuidade do estudo, com base no estudo desenvolvido nesta dissertação “Caracterização mecânicas de paredes construídas com fardos de palha”, apontam-se os seguintes trabalhos a desenvolver:

- Estudo do comportamento mecânico de paredes construídas de acordo com as técnicas aqui estudadas, quando solicitadas a esforços horizontais para fora do plano;

- Realizar a mesma caracterização mecânica em paredes descontínuas ao longo do seu comprimento (janelas e portas), construídas com base nas técnicas estudadas no presente trabalho;
- Estudar o comportamento à humidade ao longo de um ano de uma parede em fardos de palha, rebocada com a argamassa usada no revestimento das paredes testadas nesta dissertação, sujeita às condições climatéricas;
- Realizar estudo ao fogo de paredes com as características das estudadas nesta dissertação;
- Construção de quatro habitações à escala reduzidas usando a técnica estudadas, e submete-las a esforços cíclicos horizontais para ampliar o conhecimento relativamente ao comportamento deste tipo de construção face a um sismo;
- Realizar a caracterização da argamassa empregue na execução do revestimento das paredes construídas ao longo do trabalho prático desta dissertação.
- Realizar um estudo do comportamento térmico das construções com fardos de palha, recorrendo à construção de células de teste com base nas quatro técnicas estudadas neste dissertação.

## 11 Referências bibliográficas

### A

Archer, S. 2004. *The Colonial Williamsburg Foundation*. Department of Archaeological Research : s.n., 2004.

Arnaud, Laurent, La Rosa, Céline e Sallet, Frédéric. 2009. Mechanical behaviour of straw construction following the GREB technique. Lyon, France : s.n., 2009.

Ash, Cale, Aschheim, Mark e Mar, David. 2003. *In-Plane Cyclic Tests of Plastered Straw Bale Wall Assemblies*. Ecological Building Network. 2003.

Ashour, T. 2003. *The Use of Renewable Agricultural By-Products as Building Materials*. University Zagazig. Benha, Egypt : s.n., 2003.

### B

Baindridge, David, Steen, Athena, et Steen, Bill. 1994. The straw bale house. s.l. : Chelsea Green Publishing co, 1994.

Bigland e Pritchard. 2005. *The Assessment of the Viability of Strawbale Wall Construction in Buildings in Maritime Temperate Climates*. The University of Sheffield. Department of Architectural Studies. : s.n., 2005.

Blum, Brandice. 2002. *Load Carrying Behavior of On Edge Straw Bale Walls*. University of Manitoba. Manitoba : Winnepeg, 2002.

Bou-ali, G. 1993. Straw Bales and Straw-Bale Wall Systems. University of Arizona, Tucson : s.n., 1993.

Bouter, André e King, Brouce. 2009. *Concevoir des bâtiments en bottes de paille*. s.l. : Eyrolles, 2009.

Brossamain, V e Thevard, JB. 2006. Construire son habitation en paille selon la technique du G.R.E.B. s.l. : Edition V.Brossamain, Mars de 2006.

### C

Carrick, J e Glassford, J. 1998. *Vertical Loading, Creep, Transverse Loading and Racking Loading on Plastered Straw-Bale Walls*. Université de Nouvelle-Galles du Sud. Australie : s.n., 1998.

Chiras, Daniel D. 2004. *The New Ecological Home: The Guide Green Buiding Options*. s.l. : Chelsea Green Pub, 2004.

Clynes, James. 2009. *Decay Characteristica of Different Types of Straw Used in Straw Bale Building*. London : s.n., 2009.

## **D**

Dreger, Derek e Dick, Kris. 2002. *Compression Resistance of a Stuccoed Straw Bale Wall*. University of Manitoba. Camada : Winnepeg, 2002.

## **F**

Faine, Michael e Zhang, John. 2002. *A Pilot Study examining The Strength, Compressibility and Servicebility of Rendered Straw Walls for Storey Load Bearnig Construction*. University of Western Sydney. Austrália : s.n., 2002.

## **J**

Jenkins, J. 2005. *The Humanure Handbook. A Guide to Composting Human Manure*. U.S.A : Chelsea Green Publishing. White River Junction, 2005.

## **K**

King, Bruce. 1996. *Buildings of Earth and Straw*. Green Building Press. San Rafael, California : s.n., 1996.

Kobayashi, N, Chida, A e Saigusa, M. 2006. *Effect of Long-Term Application of Rice Straw on the Plant Available Silicon of Paddy Soil*. Philadelphia, Pennsylvania, USA. : International Union of Soil Sciences., 2006.

Krumm, Olivier, Cauderay, Elsa e Fuchs, Stéphane. 2009. *La Construction en Botte de Pallie*. Lausanne : s.n., 2009.

## **L**

Lerner, k, Theis, B e Smith, D. 2000. *"Straw-Bale," Alternative Construction:Contemporary Natural Building Material*. New York : John Wiley & Sons, 2000.

## **M**

Macdonald, S.O. 2003. *Straw bale construction*. 2003.



Magwood, C e Mack, P. 2000. *Straw Bale Building*. Gabriola Island : New Society Publishers, 2000.

Mar, D. 2003. *Bearing Test of Plastered Straw Bales, Ecological Building Network*. Sausalito, Californie : s.n., 2003.

McGill, Nadia. 2009. *ADRA Straw Bale Housing Becomes an Eco-Friendly Solution for Post-Earthquake China*". s.l. : Thomas Reuters Foundation, 2009.

Minke, Gernot e Mahlke, Friedemann. 2005. *Building With Straw: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. s.l. : Basel:Birkhauser, 2005.

Myhrman, M e Knox, J. 1993. *Brief History of Hay and Straw as Building Materials. The Last Straw, volume 1, no 3*. 1993.

## **P**

Palmer, Kim. 2009. *Project Might Bailout Bale Construction's image*. 2009.

Platts, B e Chapman, L. 1996. *Developing and Proof-Testing the "Prestressed Nebraska" Method for Improved Production of Baled Fibre Housing, Canada Mortgage and Housing Corporation*. 1996.

## **R**

Ruppert, J e Grandsaert, M. 1999. *A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls*. University of Colorado at Boulder : s.n., 1999.

## **S**

Summers, M.D, Blunk, S.L e Jenkins, B.M. 2003. *How Straw Decomposes*. 2003.

## **V**

Vardy, Stephen Peter. 2009. *Structural Behaviour of plastered straw bale assemblies under concentric and eccentric loading*. Queen's University. Kingston, Ontario, Canada : s.n., 2009.

## **W**

Walker, Peter. 2004. *Compression load testing straw bale walls*. Dept. Architecture & Civil Engineering Bath : s.n., 2004. p. 10.

Watts, K, *et al.* 1995. Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Relate to a Straw House, Canadian Society of Agricultural Engineering. Ottawa, Ontario : s.n., 1995.

**Y**

Yuming, Shen. 2009. Straw Building. 2009.

**Z**

Zhang, J. 2002. *Load-Carrying Characteristics of a Single*. University of Western Sydney. Australie : s.n., 2002.